

**ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Eng.**

**PAR
STÉPHANE LAVALLÉE**

**DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE DE FONTE POUR LE SUIVI
DU COUVERT DE NEIGE À L'AIDE D'IMAGERIE SATELLITAIRE**

MONTREAL, LE 12 AOÛT 2002

© Droits réservés de Stéphane Lavallée

**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

- **M. François Brissette, directeur de mémoire**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure
- **M. Robert Leconte, codirecteur**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure
- **M. Edmond Miresco, président du jury**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure
- **M. Saâd Bennis**
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET UN PUBLIC

LE 21 JUIN 2002

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE DE FONTE POUR LE SUIVI DU COUVERT DE NEIGE À L'AIDE D'IMAGERIE SATELLITAIRE

Stéphane Lavallée

Résumé

La fonte printanière, en région septentrionale, constitue un événement hydrologique important pour les gestionnaires de bassins versants, en particulier pour ceux qui doivent gérer de grands réservoirs ainsi que des installations hydroélectriques. Immédiatement avant et durant la période de fonte de la neige, un processus délicat d'optimisation doit s'effectuer pour équilibrer l'emménagement des réservoirs. Ceci à pour but d'empêcher les inondations tout en maximisant la production ultérieure d'énergie électrique. Ce projet porte sur la conception d'un modèle distribué de fonte de neige employé simultanément avec des images d'un capteur satellitaire NOAA-AVHRR. L'objectif est d'effectuer un suivi du processus de fonte de neige d'un grand bassin versant utilisé pour la production d'hydro-électricité. En utilisant des données météorologiques et géographiques, le modèle numérique calcule l'évolution du couvert de neige selon une grille d'une résolution de 1 km². Au cours de la saison de fonte active, des données NOAA-AVHRR sont saisies quotidiennement. Ces données NOAA-AVHRR sont ensuite traitées pour produire des cartes de couverture de neige à la même échelle que celle utilisée par le modèle numérique. Les cartes dérivées des données NOAA-AVHRR sont ensuite quantitativement comparées aux cartes modélisées. Tenant compte des incertitudes dans les cartes NOAA-AVHRR produites, avec une approche dite de « cellule comparable » qui incorpore la pente, les coordonnées géographiques et les données d'altitude, le modèle se réinitialise itérativement par un retour dans le temps jusqu'à ce que la différence entre les zones enneigées observées et simulées soient réduites au minimum. Une étude de cas est effectuée avec la collaboration de la compagnie Alcan pour l'application de l'approche sur un sous-bassin versant du Lac St-Jean, celui de la Chute du Diable. La saison de fonte 1999 est utilisée pour évaluer l'application d'une partie de l'algorithme. Les résultats obtenus indiquent que l'utilisation d'une seule carte dérivée de l'imagerie NOAA-AVHRR améliore significativement les prévisions du modèle. L'approche peut facilement s'intégrer à l'intérieur d'un programme opérationnel du suivi de la fonte des neiges sur un bassin versant.

DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE DE FONTE POUR LE SUIVI DU COUVERT DE NEIGE À L'AIDE D'IMAGERIE SATELLITAIRE

Stéphane Lavallée

Sommaire

Les régions septentrionales possèdent un énorme potentiel hydrique rendant ainsi les bassins versants situés dans ces zones très attrayants pour le développement et la production d'hydroélectricité. Cependant, cette ressource s'accumule principalement en période hivernale sous forme de neige rendant ainsi disponible une très grande quantité d'eau en très peu de temps lors de la saison de fonte. Il devient alors primordial pour les gestionnaires de bassins de connaître l'évolution des stocks de neige dans la période de fonte dans un but d'optimisation des installations et de sécurité publique. Les modes de gestion sont principalement basés sur des corrélations de données des années antérieures ou sur des outils peu conviviaux avec les données à traiter, réduisant ainsi la fiabilité des prévisions.

Ce projet de maîtrise porte sur le développement d'une approche novatrice pour l'amélioration des prévisions de fonte. Pour ce faire, un modèle numérique de fonte basé sur l'approche degrés-jours est conçu en tenant compte essentiellement des températures horaires, de l'albédo, de l'effet topographique, de la radiation solaire et de la végétation. Pour pallier les erreurs inhérentes à la modélisation, un algorithme est créé pour intégrer au modèle de fonte un ajustement automatique à l'aide de données de télédétection provenant d'images satellitaires NOAA-AVHRR.

Une étude de cas est effectuée avec la collaboration de la compagnie Alcan pour l'application de l'approche sur un sous-bassin versant du Lac St-Jean, celui de la Chute du Diable. La saison de fonte 1999 est utilisée pour évaluer l'application d'une partie de l'algorithme. La simulation en temps réel effectuée démontre le gain appréciable en terme de précision des prévisions que permet cette nouvelle approche. En effet, dès l'acquisition d'une première image satellite, l'erreur sur la prévision du débit de pointe est diminuée à 2 jours, et est ensuite réduite à moins d'une journée avec l'utilisation d'une deuxième image acquise le surlendemain. Bien que la méthode donne de bons résultats préliminaires, des simulations sur d'autres saisons de fonte devront être effectuées pour validation de même que le développement complet de l'algorithme d'intégration des données de télédétection.

DEVELOPMENT OF A NUMERICAL SNOWMELT MODEL WITH SATELLITE IMAGERY ASSISTANCE FOR THE SNOW COVER FOLLOW-UP

Stéphane Lavallée

Abstract

The northern region basins have a huge hydric potential. The watersheds located in these zones are very attractive for hydropower development projects. Snowfall represents a large portion of the annual water available in these basins. During the snowmelt period, a large quantity of water is suddenly released in a short period of time. During that period, watershed managers require information on the evolution of the snowpack in order to optimize power production and to ensure public safety in the event of potential flooding. Often, management methods are based on simple correlations based on data collected from previous years or on inappropriate tools for data interpretation. Both of these factors can affect the reliability of the forecasts.

The project is concerned with the development of an approach to improve the snowmelt forecasts. A digital snowmelt model based on the degree-days approach is designed considering several factors like the hourly temperatures, the albedo, the topographic effect, the solar radiation and the vegetation index. To counterbalance the inherent modeling error, an algorithm is created to do an automatic data adjustment with the integration of NOAA-AVHRR remote sensing data into the snowmelt model.

A case study is carried out with the collaboration of the Alcan company for the application of the approach on the sub-basin Chute du Diable from the Lake St-Jean watershed. The 1999 snowmelt season was used to evaluate the application of one part of the development algorithm. A real time simulation was carried out and resulted in a significant improvement in the forecasts. With only one satellite image, the error on the flood peak forecast is decreased at two days and is then reduced to less than one day with the use of a second image, acquired two days later. While the method gave good preliminary results, simulations on other snowmelt seasons will have to be simulated out for the complete validation and development of the algorithm.

AVANT-PROPOS

Le projet de maîtrise présenté dans ce mémoire a fait l'objet d'une étroite collaboration avec le milieu industriel. La compagnie ALCAN est un partenaire important dans ce projet par une collaboration consistant à la fourniture des données qu'elle utilise dans son processus de gestion en échange de l'étude d'une problématique qui lui est propre.

D'autre part, l'aspect télédétection de ce projet fait l'objet d'une publication et d'une présentation dans le cadre d'un atelier de travail sous le titre « Tracking snow melt with a AVHRR-Aided numerical model » présenté au Remote Sensing and Hydrology Symposium à Montpellier (France) en octobre 2001 (Lavallée et al., 2001). De même, la partie gestion qui est abordée est le sujet d'une publication et d'une présentation au 30^{ième} Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil présenté à Montréal (Canada) en juin 2002 sous le titre « Amélioration des prévisions d'un modèle numérique de fonte de neige à l'aide d'images satellites NOAA-AVHRR » (Lavallée et al., 2002).

Un l'intérêt fut porté par la communauté scientifique au sujet des travaux présentés, incitant ainsi à produire un article complet sur l'approche développée. Le contenu de ce mémoire est le corps d'un article soumis pour publication à un comité de lecture international. La publication dont le titre est « Snowmelt Water Management on a Large Basin using Numerical Model and Satellite Data » se retrouvera dans le Journal of Water Resources Planning and Management de l'American Society of Civil Engineers.

REMERCIEMENTS

Je voudrais signifier ma gratitude à mon directeur de maîtrise, le professeur François Brissette ainsi qu'à mon co-directeur professeur Robert Leconte, tous deux responsables du groupe de recherche DRAME à l'École de technologie supérieure. Ils ont été pour moi des mentors pour leur niveau élevé de connaissances mais également des collègues de travail incomparables tant du point de vue de leur collaboration que du plaisir que j'ai eu à échanger avec eux durant cette période. De plus, leur soutien moral et la confiance dont ils m'ont fait part m'a permis de me réaliser davantage. Un dernier merci pour m'avoir donné l'occasion de voyager et de participer à des rencontres scientifiques internationales de haut calibre en hydrologie et, par le fait même, de me faire connaître ce milieu.

Je remercie les membres du jury, pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de mon mémoire et aux commentaires constructifs qu'ils ont apportés. De même, je voudrais souligner la généreuse contribution de la compagnie Alcan, particulièrement M. Bruno Larouche, pour sa totale collaboration et la fourniture des données essentielles à la réalisation de cette étude.

Le temps passé n'aurait pas été aussi agréable sans tous mes collègues de travail au DRAME avec lesquels les échanges techniques étaient d'une grande valeur sans compter les moments de loisir. Je désire en particulier présenter ma reconnaissance à Annie

Caron pour l'excellent travail réalisé au niveau du traitement des images satellitaires. De même, pour sa bonne humeur ainsi que son amitié, elle savait mettre du soleil dans le local lors des périodes difficiles. Il en est de même pour Martine Galarneau, qui par son amour de la recherche m'a beaucoup inspiré ainsi que pour ces nombreux conseils appropriés en tant qu'amie. De même, je tiens à remercier mes autres collègues de l'école pour l'aide qu'ils m'ont fournie, en particulier Mélanie Bertrand pour ses conseils et son aide grammaticale.

Du fond du cœur, je remercie mes parents, mes sœurs ainsi que mes amis pour m'avoir supporté dans cette aventure, pour le courage qu'ils m'ont donné et pour leur aide qu'ils m'ont communiquée par des petits gestes de tous les jours. Aussi, je leur suis reconnaissant pour leur patience et pour l'acceptation du peu de disponibilité que je leur offrais.

En dernier lieu, je remercie le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour le support financier qu'il m'a apporté au cours des ces deux années par l'octroi d'une bourse de deuxième cycle. Il en est de même pour la Banque Nationale et le Fonds de développement de l'École de technologie supérieure qui ont contribué à la réalisation des mes projets d'études supérieures par l'attribution de bourses. Grâce à ces nombreux appuis financiers forts appréciés, il m'a été possible de concentrer davantage mes énergies sur mon travail de recherche.

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|--|------|
| SOMMAIRE | i |
| ABSTRACT | ii |
| AVANT-PROPOS | iii |
| REMERCIEMENTS | iv |
| TABLE DES MATIÈRES | vi |
| LISTE DES TABLEAUX..... | viii |
| LISTE DES FIGURES..... | ix |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES..... | xii |
| INTRODUCTION | 1 |
| Contexte de l'étude | 1 |
| Présentation du mémoire | 2 |
| CHAPITRE 1 : ARTICLE ASCE..... | 4 |
| 1.1 Résumé..... | 4 |
| 1.2 Introduction - Problématique | 5 |
| 1.3 Modèle de fonte de neige..... | 7 |
| 1.4 La télédétection..... | 10 |
| 1.5 Intégration des images satellite..... | 12 |
| 1.6 Cas d'application | 15 |
| 1.7 Fonctionnement du modèle..... | 17 |
| 1.8 Résultats..... | 20 |
| 1.9 Discussion..... | 22 |
| 1.10 Travaux futurs..... | 24 |
| 1.11 Remerciement..... | 25 |
| CHAPITRE 2 : ÉQUATIONS DE MODÉLISATION..... | 26 |
| 2.1 Positionnement du soleil..... | 26 |
| 2.2 Calcul du facteur « K_{sa} »..... | 28 |
| 2.3 Calcul de la quantité de neige et de la température sur le bassin..... | 29 |

| | |
|--|------------|
| CHAPITRE 3 : DONNÉES DE MODÉLISATION | 32 |
| 3.1 Modèle numérique de terrain | 32 |
| 3.2 Stations météorologiques | 32 |
| 3.3 Stations nivométriques | 37 |
| 3.4 Prévisions météorologiques | 38 |
| 3.5 Apports au Lac St-Jean | 39 |
| CHAPITRE 4 : CARTES DE NEIGE MODÉLISÉES PAR SIMULATION NUMÉRIQUE | 41 |
| 4.1 Simulation initiale | 41 |
| 4.2 Simulation avec la première image satellitaire | 44 |
| 4.3 Simulation avec la deuxième image satellitaire | 47 |
| 4.4 Simulation avec la troisième image satellitaire | 50 |
| 4.5 Simulation avec la quatrième image satellitaire | 53 |
| CONCLUSION | 56 |
| ANNEXES | 60 |
| 1 : Images AVHRR du satellite NOAA-14 | 60 |
| 2 : Cartes de neige extraites d'images NOAA-AVHRR | 77 |
| 3 : Routines de programmation MATLAB du modèle de fonte de neige | 94 |
| BIBLIOGRAPHIE | 120 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|--|-------------|
| Tableau I Description des canaux des images AVHRR | 11 |
| Tableau II Données de la station météorologique Chute du Diable | 34 |
| Tableau III Données de la station météorologique Chute des Passes | 35 |
| Tableau IV Données de la station météorologique Manouane Est..... | 36 |
| Tableau V Caractéristiques des stations nivométriques..... | 37 |
| Tableau VI Données de neige au sol pour les mois de mars et avril 1999 | 37 |
| Tableau VII Prévision météorologique 7 jours (1^{ère} partie)..... | 38 |
| Tableau VII Prévision météorologique 7 jours (2^{ème} partie)..... | 39 |
| Tableau VIII Apport journalier du bassin versant de la Chute du Diable au Lac St-Jean..... | 40 |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|-----------|---|
| Figure 1 | Image NOAA-AVHRR du sous-bassin versant de la Chute du Diable et carte de la couverture de neige correspondante 12 |
| Figure 2 | Schéma de l'algorithme du modèle de fonte de neige..... 13 |
| Figure 3 | Carte de localisation du bassin versant de la Chute du Diable 16 |
| Figure 4 | Débit à l'exutoire et température de la station sud du sous-bassin versant de la Chute du Diable pour la saison de fonte 1999..... 18 |
| Figure 5 | Comparaison des cartes de neige observées et modélisées avec et sans ajustement..... 21 |
| Figure 6 | Temps pour lequel la neige atteint la ligne de fonte médiane du bassin versant selon la date d'ajustement 23 |
| Figure 7 | Schéma démontrant la déclinaison de la terre 27 |
| Figure 8 | Schéma explicatif de l'angle horaire 27 |
| Figure 9 | Schéma explicatif de l'angle azimut solaire 28 |
| Figure 10 | Schéma illustrant l'angle entre le vecteur soleil et le vecteur terrain 29 |
| Figure 11 | Représentation graphique du modèle numérique de terrain 33 |
| Figure 12 | Apport journalier du bassin Chute du Diable 40 |
| Figure 13 | Carte des températures du 27 avril 1999 41 |
| Figure 14 | Carte du couvert de neige du 27 avril 1999..... 42 |
| Figure 15 | Carte de neige du 4 mai 1999 (à gauche) et du 5 mai 1999 (à droite) 42 |
| Figure 16 | Carte de neige du 6 mai 1999 (à gauche) et du 7 mai 1999 (à droite) 43 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figure 17 | Carte de neige du 8 mai 1999 (à gauche), du 9 mai 1999 (au centre) et du 10 mai 1999 (à droite) | 43 |
| Figure 18 | Carte des températures du 27 avril 1999 | 44 |
| Figure 19 | Carte du couvert de neige du 27 avril 1999..... | 44 |
| Figure 20 | Carte de neige du 28 avril 1999 (à gauche) et du 29 avril 1999 (à droite) | 45 |
| Figure 21 | Carte de neige du 30 avril 1999 (à gauche) et du 1 ^{er} mai 1999 (à droite) | 45 |
| Figure 22 | Carte de neige du 2 mai 1999 (à gauche) et du 3 mai 1999 (à droite) | 46 |
| Figure 23 | Carte de neige du 4 mai 1999 | 46 |
| Figure 24 | Carte des températures du 27 avril 1999 | 47 |
| Figure 25 | Carte du couvert de neige du 27 avril 1999..... | 47 |
| Figure 26 | Carte de neige du 29 avril 1999 (à gauche) et du 30 avril 1999 (à droite) | 48 |
| Figure 27 | Carte de neige du 1 ^{er} mai 1999 (à gauche) et du 2 mai 1999 (à droite) | 48 |
| Figure 28 | Carte de neige du 3 mai 1999 (à gauche) et du 4 mai 1999 (à droite) | 49 |
| Figure 29 | Carte de neige du 5 mai 1999 | 49 |
| Figure 30 | Carte des températures du 27 avril 1999 | 50 |
| Figure 31 | Carte du couvert de neige du 27 avril 1999..... | 50 |
| Figure 32 | Carte de neige du 30 avril 1999 (à gauche) et du 1 ^{er} mai 1999 (à droite) | 51 |
| Figure 33 | Carte de neige du 2 mai 1999 (à gauche) et du 3 mai 1999 (à droite) | 51 |

| | | |
|------------------|--|-----------|
| Figure 34 | Carte de neige du 4 mai 1999 (à gauche) et du 5 mai 1999 (à droite) | 52 |
| Figure 35 | Carte de neige du 6 mai 1999 | 52 |
| Figure 36 | Carte des températures du 27 avril 1999 | 53 |
| Figure 37 | Carte du couvert de neige du 27 avril 99..... | 53 |
| Figure 38 | Carte de neige du 30 avril 1999 (à gauche) et du 1^{er} mai 1999 (à droite) | 54 |
| Figure 39 | Carte de neige du 2 mai 1999 (à gauche) et du 3 mai 1999 (à droite) | 54 |
| Figure 40 | Carte de neige du 4 mai 1999 (à gauche) et du 5 mai 1999 (à droite) | 55 |
| Figure 41 | Carte de neige du 6 mai 1999 | 55 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

| | |
|------------------------|--|
| ASCE | American Society of Civil Engineers |
| AVHRR | Advanced very high resolution radiometer |
| DEM | Digital elevation model (voir MNT), m |
| DRAME | Développement et recherche appliquée en modélisation environnementale, groupe de recherche de l'École de technologie supérieure |
| CRSNG | Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada |
| MNT | Modèle numérique de terrain, m |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| USGS | United States Geological Survey |
| WGS84 | World Geodetic System 1984, projection géographique |
| Q | Débit, m³/s |
| T | Température, °C |
| m | mètre |
| m³ | mètre cube |
| km | kilomètre |
| km² | kilomètre carré |
| µm | micromètre |
| MW | mégawatt |
| m³/s | mètre cube par seconde |
| °C | degrés celsius |

INTRODUCTION

Contexte de l'étude

Le développement industriel repousse constamment les limites de l'utilisation du territoire, en particulier lorsqu'il s'agit de rentabilité d'entreprise. En effet, certaines industries s'établissent dans des régions précises afin de tirer parti de certaines ressources comme c'est le cas avec l'hydroélectricité. Cette source d'énergie renouvelable et peu coûteuse a amené le développement de régions situées au nord des zones urbanisées. C'est le cas notamment de l'industrie de l'aluminium qui s'est grandement développée à proximité des ressources hydriques dans la région du Saguenay – Lac St-Jean.

Étant donné l'importance des investissements pour l'exploitation de ces industries et du développement urbain qui s'en suit, la connaissance des ressources en eau est primordiale pour les gestionnaires d'installations d'hydroélectricité. C'est pourquoi certains outils sont développés et utilisés pour optimiser les opérations de gestion. Cependant on constate un manque important dans la maîtrise de certains aspects du cycle hydrologique. Ces lacunes sont principalement reliées au manque de connaissance du territoire et, par le fait même, par l'hétérogénéité des différents éléments qui le composent.

Plusieurs stratégies sont utilisées pour pallier ces manques de connaissance du cycle hydrologique. Parmi celles-ci, les plus couramment utilisées sont la modélisation numérique, l'utilisation de méthodes statistiques ou l'établissement de règles empiriques provenant d'expérimentation. Quelle que soit la méthode utilisée, un point demeure essentiel celui de la justesse des prévisions hydrologiques. Des prévisions fiables sont un atout considérable pour les gestionnaires puisqu'il devient alors possible d'effectuer des interventions de façon proactive.

Présentation du mémoire

Dans le cadre de ce projet, une nouvelle approche est abordée dans le but de développer un outil de prévision hydrologique offrant une fiabilité accrue pour les gestionnaires de bassins versants. La partie du cycle hydrologique considérée est la fonte de la neige, car elle représente un élément important dans les régions septentrionales.

Le projet développé est le fruit d'une collaboration avec la compagnie d'électrolyse Alcan. Le but est d'explorer les possibilités qu'offre la télédétection pour effectuer la gestion d'un grand bassin versant en période de fonte de neige. Pour ce faire, l'approche globale de la simulation de la fonte de neige doit faire en sorte de permettre une intégration efficace des données de télédétection. Les données de télédétections utilisées sont celles présentement utilisées par Alcan, soit des images NOAA-AVHRR dont les corrections de projection sont effectuées par le département de géographie de l'Université du Québec à Chicoutimi.

Ce mémoire se constitue de la version française d'un article soumis au comité de lecture du Journal of Water Resources Planning and Management de l'American Society of Civil Engineers (ASCE). Il expose en premier lieu la problématique du projet au niveau de la gestion et de la modélisation. La description complète du modèle numérique conçu est présentée avec l'explication de ses composantes. La télédétection est abordée aux fins d'explication des méthodes d'extraction d'information sur le couvert neigeux à partir des données satellitaires. Ensuite, le processus d'intégration des données de télédétection est traité suivi d'un algorithme spécialement conçu dans le cadre de ce projet. Une étude de cas appliqué à un bassin versant géré par la compagnie Alcan, suivie d'une présentation et d'une analyse des résultats de l'application de la méthode sont ensuite montrées. L'article se termine avec l'énoncé des travaux à venir et des remerciements d'usage.

Le deuxième chapitre regroupe les équations mathématiques utilisées pour le développement du modèle de fonte. Bien qu'une partie des équations soit mentionnée dans le corps de l'article du chapitre I, ce chapitre présente les équations complémentaires relatives au positionnement du soleil, au calcul de facteur K_{sol} et à la distribution de la neige et de la température sur le bassin.

Au chapitre 3, un regroupement des données ayant servies à la modélisation et aux simulations est présenté. On y traite du modèle numérique de terrain, des données provenant des stations météorologiques et nivométriques. De plus, les prévisions météorologiques ainsi que les apports du bassin versant de la Chute du Diable y sont mentionnés.

Le chapitre 4 présente les résultats de la simulation en temps réel. On retrouve la démarche qui a été effectuée à mesure que des images satellitaires étaient disponibles ainsi que les figures produites par le modèle de fonte de neige sur le bassin versant.

En dernier lieu, la conclusion du mémoire fait un retour sur l'article et précise la nature des travaux à venir. En annexe, sont regroupés l'ensemble des informations utilisées dans l'élaboration de ce projet. L'annexe 1 présente les images prises avec le capteur AVHRR du satellite NOAA-14. On retrouve à l'annexe 2 les cartes de neige qui ont été produites à l'aide des données de télédétection. Finalement, l'ensemble du code de programmation développé avec le logiciel MATLAB est présenté à l'annexe 3.

CHAPITRE 1

ARTICLE ASCE

AMÉLIORATION DES PRÉVISIONS DE FONTES DE NEIGE D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE À L'AIDE D'IMAGES SATELLITES NOAA-AVHRR

1.1 Résumé

Dans les régions nordiques, la fonte printanière constitue un événement hydrologique important pour les gestionnaires de bassins versants, en particulier pour ceux qui doivent gérer de grands réservoirs ainsi que des installations hydroélectriques. Immédiatement avant et durant la période de fonte de la neige, un processus délicat d'optimisation doit s'effectuer pour équilibrer l'emmagasinement des réservoirs. Ceci a pour but d'empêcher les inondations tout en maximisant la production ultérieure d'énergie électrique. Au Québec, la majorité des réservoirs de grandes dimensions sont situés en régions éloignées et les bassins sont généralement peu instrumentés, rendant ainsi plus difficile l'utilisation de modèles hydrologiques. Cet article décrit l'utilisation d'un modèle distribué de fonte de neige employé simultanément avec des images d'un capteur satellitaire NOAA-AVHRR pour suivre le processus de fonte de neige d'un grand bassin versant utilisé pour la production d'hydroélectricité. En utilisant des données météorologiques et géographiques, le modèle numérique calcule l'évolution du couvert de neige selon une grille d'une résolution de 1 km². Au cours de la saison de fonte active, des données NOAA-AVHRR sont saisies quotidiennement. Ces données NOAA-AVHRR sont ensuite traitées pour produire des cartes de couverture de neige à la même échelle que celle utilisée par le modèle numérique. Les cartes dérivées des données NOAA-AVHRR sont ensuite quantitativement comparées aux cartes modélisées. Tenant compte des incertitudes dans les cartes NOAA-AVHRR produites, avec une approche dite de « cellule comparable » qui incorpore la pente, les coordonnées géographiques et les données d'altitude, le modèle se réinitialise itérativement par un retour dans le temps jusqu'à ce que la différence entre les zones enneigées observées et

simulées soient réduites au minimum. Les résultats obtenus indiquent que l'utilisation d'une seule carte dérivée de l'imagerie NOAA-AVHRR améliore significativement les prévisions du modèle. L'approche peut facilement s'intégrer à l'intérieur d'un programme opérationnel du suivi de la fonte des neiges sur un bassin versant.

1.2 Introduction - Problématique

Dans les régions septentrionales de nombreux pays, la gestion des ressources en eau fait face à des problématiques particulières. Les bassins versants septentrionaux sont souvent situés loin des centres urbains, rendant ainsi leur accès difficile. Dans certains pays tel que le Canada, ces bassins occupent de très grandes superficies pouvant aller jusqu'à plusieurs centaines de milliers de kilomètres carrés. La connaissance de ces bassins est souvent fragmentaire et les données historiques sont peu détaillées et souvent peu représentatives puisque les instruments de mesure sont rares et dispersés sur de très grands territoires. Cette représentativité est particulièrement problématique lorsqu'on veut utiliser ces données à l'intérieur de modèles d'hydrologie déterministes. Il devient donc nécessaire d'avoir recours à des modèles moins empiriques permettant l'analyse de façon plus "physique".

Les bassins septentrionaux sont aussi caractérisés par la présence de neige. La neige représente une quantité importante des ressources en eau du bassin pouvant aller jusqu'à 75% des précipitations annuelles pour certaines régions montagneuses (Rango et al., 2000) et jusqu'à 90% du ruissellement annuel. En période de fonte, la réponse hydrologique est importante, car à l'intérieur d'une courte période de temps variant de quelques semaines à deux ou trois mois, cette eau devient disponible dans le bassin versant. La connaissance adéquate de l'évolution des stocks de neige est primordiale afin de gérer adéquatement les eaux de ruissellement, que ce soit dans une optique de prévention des inondations ou de production hydroélectrique.

Compte tenu de la dimension de ces bassins, de leur éloignement et de leur faible instrumentation, la télédétection est un outil attrayant de suivi des conditions hydrologiques pour les gestionnaires de ces bassins. Les images de télédétection permettent de couvrir de grandes superficies pouvant aller jusqu'à l'ensemble du bassin versant. La qualité de certains types d'images est indépendante des conditions météorologiques et plusieurs offrent une couverture temporelle fréquente permettant une gestion serrée lorsque les événements l'exigent. L'information hydrologique pouvant être extraite de la télédétection est variée (Bonn et Rochon 1992, Richards 1993, Schultz et Engman 2000) et regroupe entre autres l'utilisation du sol, le couvert végétal, l'humidité du sol, l'étendue du couvert de neige, les précipitations et l'évapotranspiration. L'information est transmise en format numérique la rendant facilement manipulable avec les outils de gestion moderne.

Il n'est pas toujours évident de faire cohabiter ensemble modèle numérique et télédétection de façon simple et opérationnelle (Kite et Pietroniro, 1996). La télédétection mesure les paramètres hydrologiques de manière indirecte et l'information doit être traitée, parfois d'une manière complexe avant d'être utilisable à l'intérieur de modèles hydrologiques. Le processus ne peut pas toujours être entièrement automatisé et la présence humaine est encore souvent nécessaire, particulièrement lors de l'analyse d'images, afin de fixer adéquatement différents paramètres d'extraction d'information. Les délais entre la prise des images et leur utilisation sont souvent trop longs dans un contexte opérationnel et les coûts d'acquisition d'images pour certains capteurs demeurent prohibitifs.

D'autres problèmes résident du côté des modèles numériques. Les modèles complexes qui sont développés sont souvent difficiles à faire fonctionner dans un cadre opérationnel, particulièrement lors d'un suivi en temps réel. Les exigences en données de base dépassent souvent ce qui est disponible dans l'industrie. Des problèmes de complexité dans l'initialisation, le calibrage et la validation du modèle, de même que des

problèmes de stabilité numérique peuvent facilement rendre l'utilisation de certains modèles extrêmement difficile dans un contexte opérationnel.

Toutefois, la présence sans cesse croissante de satellites d'observation terrestre, les coûts décroissants des acquisitions, la fiabilité et la rapidité dans le transfert des images, ainsi que la capacité accrue de calcul numérique, permettent d'envisager de plus en plus un couplage efficace entre télédétection et modèles numériques, et ce dans un contexte opérationnel.

Ce projet vise le couplage d'images de télédétection avec un modèle numérique de fonte de la neige de façon à améliorer les prévisions de fonte dans un contexte opérationnel (Rango et al., 2000). L'objectif de ce projet est d'établir un processus d'intégration en temps réel de données de télédétection afin d'accroître l'efficacité de la gestion des ressources hydriques. Ainsi, le projet tente de mettre en évidence l'importance de l'apport de la télédétection dans l'amélioration des prévisions hydrologiques, en particulier en période de fonte de neige.

1.3 Modèle de fonte de neige

Les modèles d'hydrologie qui font appel à la télédétection sont peu nombreux tel que HydAlp (Rott et al., 1999), Hydrotel (Fortin et al., 1995), Snowmelt Runoff Model (SRM) (Rango, 1995) et Slurp (Kite, 1995). Bien que certains de ces modèles traitent de la fonte de la neige, d'autres n'utilisant pas la télédétection sont également utilisés comme le UBC Watershed Model (Quick, 1995) et HEC-1 (Feldman, 1995).

Dans le cadre de ce projet, un nouveau modèle est conçu pour répondre adéquatement aux besoins établis. Ce choix s'explique par l'intérêt d'incorporer en temps réel, dans un contexte opérationnel, des données de télédétection. Il est également plus simple d'orienter le développement du modèle pour l'utilisation des données qui sont

accessibles dans l'industrie. De plus, un meilleur contrôle des différents paramètres de gestion est possible tout en conservant un produit simple et complet.

Un modèle déterministe est favorisé dans cette étude car il tient compte de la connaissance physique des phénomènes éliminant les éléments aléatoires. Cependant, certains éléments physiques sont schématisés pour simplifier certains phénomènes. Le modèle est donc en partie conceptuel.

La discrétisation préconisée du territoire dans le modèle proposé s'effectue suivant une grille carrée uniforme et régulière. Ce maillage est pour faciliter la compatibilité entre les différentes sources de données numériques tel que le modèle numérique d'élévation et les images NOAA-AVHRR.

Les bases du modèle de fonte de neige doivent être cohérentes avec les données disponibles et doivent être compatibles avec les données de télédétection. Les modèles existants se regroupent en deux catégories principales (Dunn et Colohan., 1999) soit les approches simplifiées du type degrés-jours et celles reposant sur un bilan énergétique (Anderson, 1976).

Compte tenu du contexte opérationnel de cette étude, le choix s'est porté sur un modèle conceptuel simple basé sur l'approche des degrés-jours. Bien que moins performante (Kuchment et Gelfan, 1996), cette approche se démarque par sa simplicité en mettant en évidence le gain que permet d'obtenir le jumelage d'un modèle de fonte avec des données de télédétection, tout particulièrement en période de fonte printanière. La complexité d'un modèle est un facteur critique notamment pour des applications opérationnelles et souvent, le meilleur modèle s'avère être le plus simple parmi ceux qui répondent aux critères d'utilisation spécifiques à un cas particulier (Rousselle et al., 1990).

Les bases générales du modèle sont présentées dans Martinec (1960) et Dunn et Colohan (1999). Ainsi, en plus des écarts de température, l'équation développée tient compte des facteurs reliés à la végétation, à la topographie et au couvert neigeux. Afin de mieux modéliser l'influence du soleil, le modèle fonctionne selon un pas de temps horaire. L'équation de fonte de neige est définie par :

$$M_f = k \cdot k_v \cdot k_{sa} (1 - A) \cdot (T_a - T_b) \quad (1.1)$$

Où « M_f » est le taux de fonte de la neige en mm/h. Le facteur de fonte de la neige « k » est exprimé en mm/h/°C dont la valeur est établie en cours de simulation. Pour débiter, le facteur « k » sera basé sur la connaissance des années antérieures du bassin. L'influence du couvert végétal sur la fonte de la neige « k_v », est représentée par le coefficient de transmission des radiations solaires (U.S. Army Corps of Engineers, 1956) :

$$k_v = e^{-4C_v} \quad (1.2)$$

Où « C_v » représente la densité du couvert végétal (variant entre 0 et 1) présent sur le bassin versant. Les valeurs de « C_v » peuvent être obtenues à partir d'indices de végétation comme l'index de feuillus, eux-mêmes dérivés à partir d'images de télédétection, car ils sont reliés à la biomasse totale (Gorte, 2000).

Le facteur relatif à la pente et à l'inclinaison, « K_{sa} », se calcule en tenant compte de l'angle θ_{st} qui se définit par la position du soleil avec la normale du plan du terrain. L'échelle de valeur doit être ajustée en fonction du territoire selon la topographie. Dans le cas présent, à la suite d'expérimentation, il a été établi que « K_{sa} » varie entre $B_{min} = 0,01$ (absence de rayonnement) et $B_{max} = 1,00$ (rayonnement perpendiculaire à la surface).

$$K_{sa} = B_{min} + \cos(\theta_{s/t})^2 \times (B_{max} - B_{min}) \quad (1.3)$$

La réflectivité « A » ou l'albédo de la neige a un impact majeur sur le taux de fonte puisqu'elle influence le taux d'absorption de l'énergie solaire par le couvert de neige. Cette variable est fonction du temps écoulé depuis la dernière neige tombée où elle est à son maximum et diminue avec le temps. Sur une base journalière, la diminution de l'albédo en fonction du temps peut se calculer par (US Army Corps of Engineers, 1956) :

$$A(t) = 0,40(1 + e^{-K_a t}) \quad (1.4)$$

La variable « k_a » a été établie à 0,20 (US Army Corps of Engineers, 1956) et le temps représente le nombre de jours écoulés depuis la dernière chute de neige. La valeur de l'albédo du couvert de neige varie donc normalement entre 0.8 et 0.4 (Klein et al., 2000).

Le paramètre « T_b » représente la température de base en °C, à partir de laquelle la neige commence à fondre. La valeur « T_b » est près du point de fusion de l'eau et se situe généralement entre 0 et 4°C pour les modèles journaliers (ASCE, 1996). La variable « T_a » représente la température maximum de l'air pour l'intervalle de calcul horaire du modèle.

1.4 La télédétection

Les données de télédétection utilisées dans le présent projet proviennent de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Une série d'images a été saisie par le capteur multibande Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) du satellite NOAA-14. Ces images ont d'abord fait l'objet d'une correction de projection pour ensuite être géoréférencées. La résolution au sol de ce capteur est d'environ 1,1 km

et la largeur de la trace atteint 2700 km dans les deux sens permettant de balayer toute la région à l'étude. Pouvant aller jusqu'à cinq bandes spectrales, les images ont été saisies selon trois canaux spécifiques tel que présentés dans le tableau I.

Tableau I
Description des canaux des images AVHRR

| Canal | Description |
|-------|---|
| 1 | Visible (0.58 – 0.68 μm) |
| 2 | Infrarouge rapproché (0.72 - 1.1 μm) |
| 3 | Infrarouge thermique (3.55 - 3.93 μm) |

(tiré de Richards, 1993)

Un premier obstacle dans l'utilisation des images AVHRR est la similitude des signatures spectrales dans le domaine du visible entre le couvert de neige et les nuages. Avant même d'aller plus loin dans l'utilisation des données de télédétection, on se doit d'enlever les informations relatives aux nuages dans le but d'identifier plus aisément le couvert de neige. Différentes approches ont été proposées à cet effet (Simpson et al., 1998) mettant généralement l'emphasis sur les différences entre les signatures spectrales des nuages et de la neige dans l'infrarouge thermique. Dans cette étude, une classification dirigée utilisant la fonction paramétrique de la méthode du maximum de ressemblance a été utilisée afin de séparer les nuages, la neige et les zones découvertes. La présence ou l'absence de la neige sous les nuages est ensuite inférée par comparaison avec des pixels similaires en terme d'élévation, de latitude et d'orientation. Le produit final de cette classification consiste en des cartes présentées sous forme binaire pour l'ensemble du bassin à savoir s'il y a de la neige ou non tel que présenté à la Figure 1.

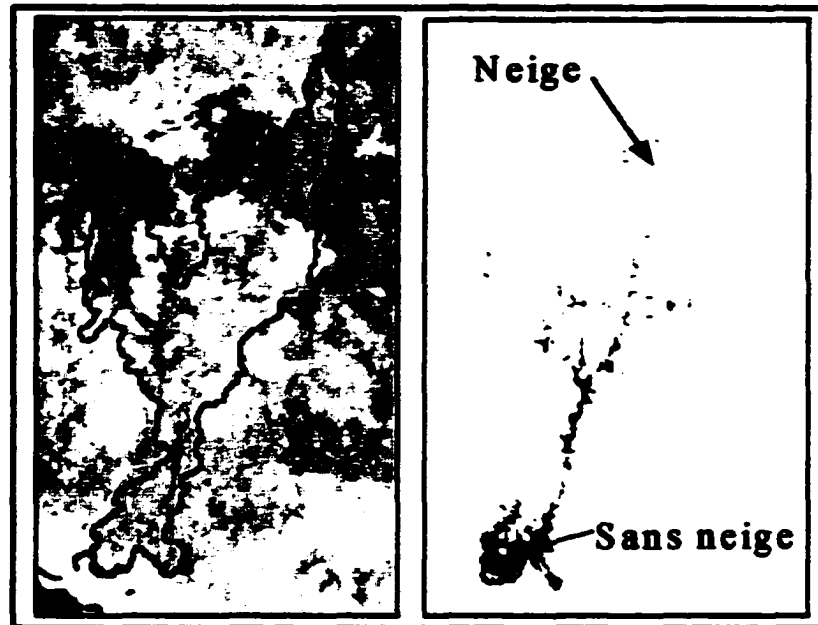


Figure 1 Image NOAA-AVHRR du sous-bassin versant de la Chute du Diable et carte de la couverture de neige correspondante

Une autre approche fut également utilisée permettant de valider les résultats de la classification dirigée. Il s'agit de la méthode développée par Maxson et al.(1996). Elle consiste en une classification des images à partir d'une carte thématique dont chaque pixel correspond à un angle θ calculé entre un vecteur unitaire et un vecteur multidimensionnel dont les composantes sont les valeurs de réflectance provenant des différents canaux. Les résultats obtenus avec cette approche se sont révélés similaires à ceux obtenus selon la classification dirigée.

1.5 Intégration des images satellite

Le but recherché par ce projet est d'utiliser en temps réel l'information extraite des images AVHRR dans un modèle numérique de fonte de neige. La Figure 2 présente la façon dont les images AVHRR sont introduites et utilisées à l'intérieur du modèle numérique de fonte de neige. D'autres algorithmes utilisant la télédétection de façon similaire ont déjà été développés dans un contexte d'extraction de l'humidité du sol (Li et al, 1998). L'algorithme est conçu pour palier à deux manques importants dans la

progression de la fonte de neige. Ces lacunes sont essentiellement reliées au facteur de fonte et à l'épaisseur de neige au sol. Le facteur de fonte est établi empiriquement et peut représenter une source d'erreur importante étant donné le poids qui lui est accordé dans l'équation. De plus, l'épaisseur de neige est une source d'erreur non négligeable puisque les grands bassins versant sont très peu instrumentés, obligeant ainsi à extrapoler cette variable pour un grand territoire à partir de quelques valeurs ponctuelles.

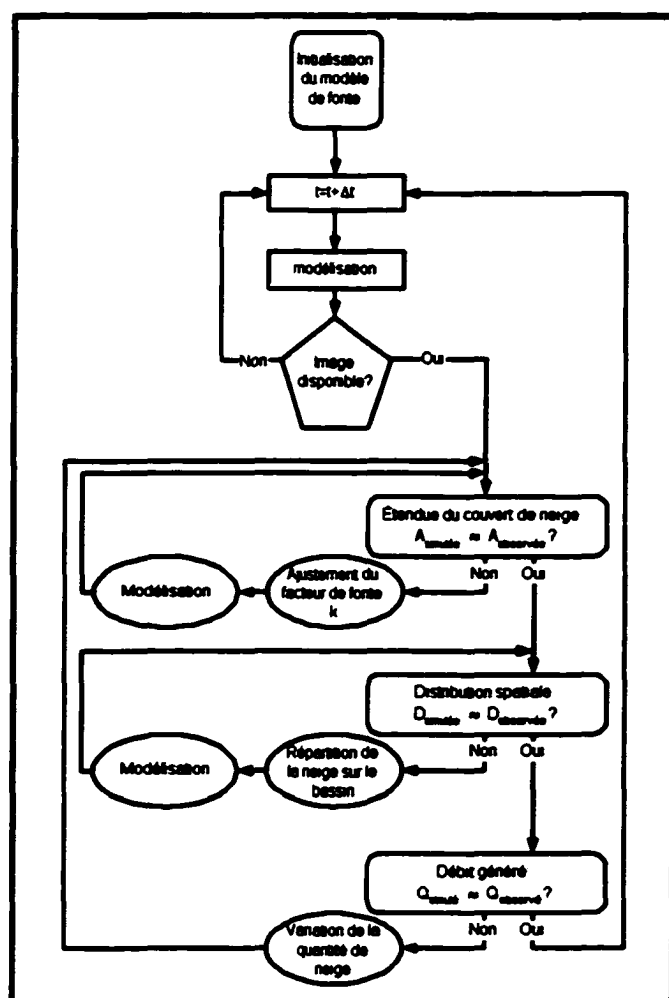


Figure 2 Schéma de l'algorithme du modèle de fonte de neige

Le modèle est initialisé avec des valeurs de mesure prises sur le terrain ou par des valeurs prédéterminées basées sur l'expérience des années précédentes. À partir de ce point, le modèle commence les simulations pour la période définie. Des cartes

journalières sont produites indiquant sous forme binaire les endroits enneigés. Lorsqu'une image AVHRR est disponible, elle est utilisée pour ajuster le modèle. Cette image doit être le plus possible exempte de nuages et présenter une démarcation claire du couvert de neige au sol. À la date correspondant à l'image satellitaire, les cartes de neige observées et simulées sont comparées au niveau de la quantité des aires de recouvrement de la neige. Dans le cas où le modèle produirait des cartes de neige semblables à ce qui est observé, aucune correction n'est apportée. Dans le cas contraire, un processus itératif débute afin de corriger le facteur de fonte « k ». Ce processus implique que le modèle est réinitialisé avec une nouvelle valeur de « k » et que la simulation recommence au temps $t = 0$ à chacune des itérations jusqu'à ce que l'erreur soit acceptable entre la carte simulée et observée à la date de l'image AVHRR. Lors de cette première étape, il est donc supposé que les quantités de neige initiales sont correctes. Le facteur de fonte est supposé uniforme sur l'ensemble du bassin.

Une fois que les superficies de recouvrement de la neige sont comparables, il faut procéder à la validation de la distribution géographique de la neige. Ce point est important particulièrement lorsque vient le temps de jumeler le modèle de fonte avec un modèle d'écoulement, car les temps de parcours en sont directement dépendants. Pour ce faire, le modèle compare par tranche d'altitude et de latitude la localisation de la neige. S'il y a lieu, une redistribution de la neige s'effectue, elle aussi de façon itérative, en s'assurant de conserver la même superficie. Cette répartition de la neige a lieu au temps $t = 0$ et le modèle recommence la simulation du début jusqu'à l'obtention d'une bonne similitude au niveau de la distribution spatiale au moment de l'acquisition de l'image NOAA-AVHRR. Une fois les corrections faites, le modèle poursuit les prévisions hydrologiques avec la nouvelle valeur de « k » et la nouvelle épaisseur de neige au sol.

La dernière étape de l'algorithme consiste à la vérification et l'ajustement de la quantité d'eau disponible sur le bassin. Elle intervient à la toute fin du processus de simulation,

quelques temps après l'acquisition de l'image satellitaire correspondante, durée équivalente au temps de concentration du bassin. Cette étape utilise les valeurs de débits à l'exutoire du bassin pour revenir au début ajuster les quantités d'équivalent en eau de la neige. À la suite de cet ajustement, de nouvelles prévisions sont produites.

1.6 Cas d'application

Le modèle a été testé sur un des bassins versants desservant le potentiel hydroélectrique de la compagnie Alcan. Alcan est un important producteur d'aluminium qui, pour suffire à ses usines d'électrolyse, a graduellement développé ses propres installations énergétiques. Concentrée dans le bassin du Lac St-Jean, elle opère six centrales hydroélectriques pour une puissance annuelle totale de 1935 MW permettant la production annuelle de 700 000 tonnes métriques d'aluminium.

Le bassin versant alimentant ces installations est d'une superficie totale de 73 800 km² situés au nord du 48^e parallèle. Il comporte trois réservoirs d'importance dont le plus grand est le Lac St-Jean, un lac naturel d'une superficie d'environ 1000 km² et d'une capacité d'emmagasinement de $5,4 \times 10^9$ m³. Trois centrales sont situées juste en aval du lac et produisent près de 1300 MW, alors que les trois autres sont en amont du lac, sur la rivière Péribonka.

Dans le cadre de cette étude, le modèle est appliqué à un sous-bassin, celui de la Chute du Diable (Figure 3). Ce bassin représente un élément clé dans la gestion en période de fonte car c'est par lui que transite la plus grande partie du débit sur la rivière Péribonka. La superficie du bassin est de 9700 km², la topographie du terrain est montagneuse et la dénivellation moyenne du territoire est d'environ 400 m. Deux rivières majeures traversent le sous-bassin, soit la rivière Manouane et la rivière Péribonka.

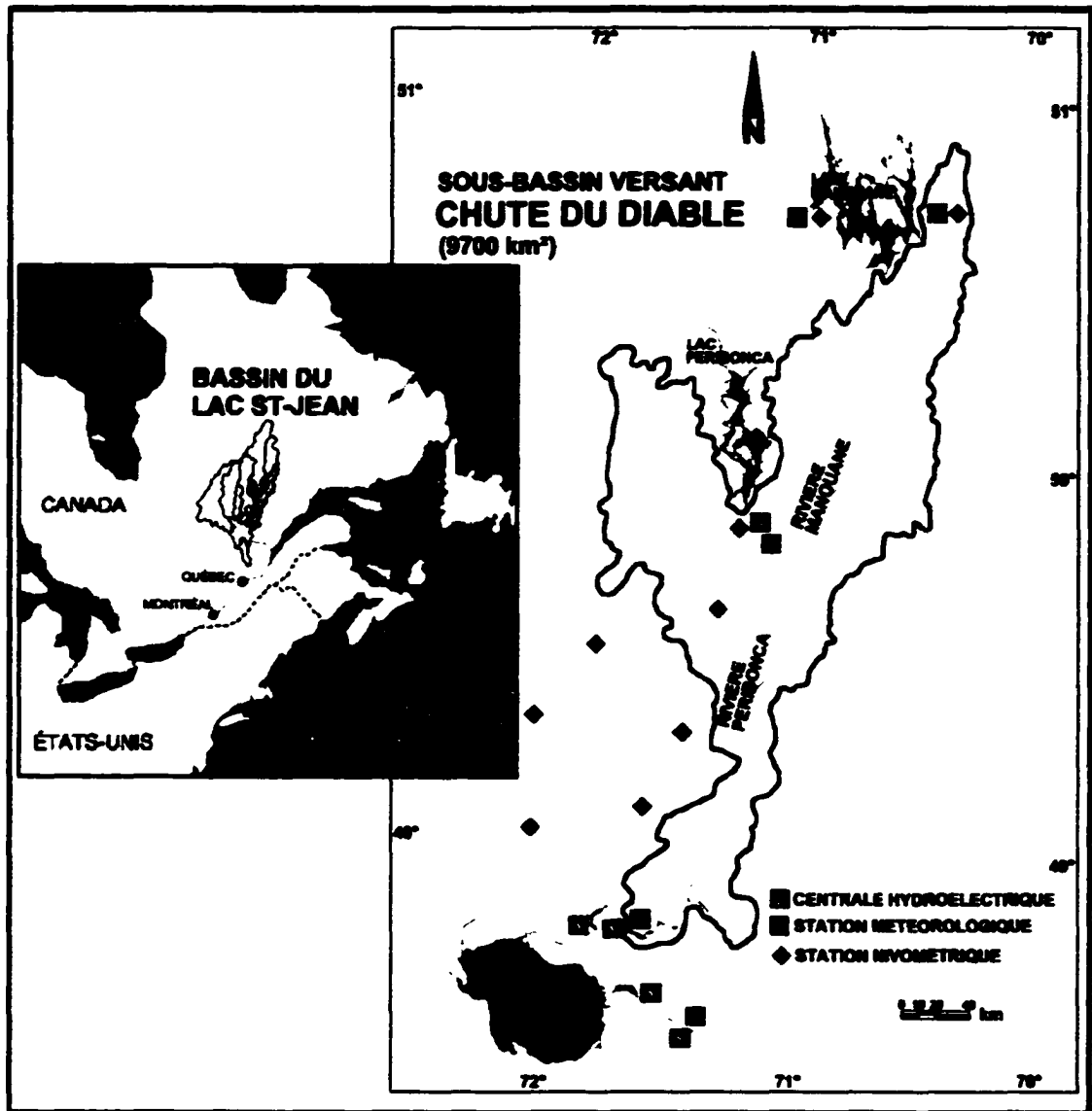


Figure 3 Carte de localisation du bassin versant de la Chute du Diable

Alcan se doit d'effectuer une gestion efficace de ses bassins en minimisant les risques d'inondation, aux fins de garantir la sécurité des habitants et des biens, tout en conservant un niveau d'eau élevé dans ses réservoirs afin de maximiser sa production électrique et rentabiliser ses équipements. La problématique s'accroît particulièrement lors de la saison de fonte, située généralement entre le 1^{er} avril et le 30 juin, puisque le

volume d'eau atteignant le lac durant cette période représente approximativement 50% des valeurs annuelles.

Le système de gestion actuel d'Alcan se subdivise en trois composantes principales : l'acquisition des données, l'analyse des données et la prise de décision. Les données acquises consistent en des données hydro-météorologiques (débit, niveau d'eau, température, épaisseur de neige, équivalence en eau, etc.) et aux prévisions météorologiques à court terme. Ces données sont incorporées dans un modèle conceptuel permettant de faire des simulations et des prévisions. De plus, quotidiennement, en saison de fonte, des images AVHRR sont utilisées pour vérifier l'évolution du couvert neigeux. Ces images sont inspectées visuellement afin de localiser la ligne de fonte de neige dans le sous-bassin. Une corrélation est établie entre la position de cette ligne de neige et le débit arrivant au Lac St-Jean. La règle de gestion utilisée par Alcan est d'interrompre les déversements par les évacuateurs de crue du lac au moment où la ligne de neige se situe vers le milieu du bassin, car c'est à ce moment que le débit de la fonte de la neige arrivant au lac est à son maximum. Cette façon de faire repose essentiellement sur des critères subjectifs et expérimentaux susceptibles d'engendrer des erreurs significatives au niveau de l'optimisation de la production électrique. De plus, les informations recueillies de cette façon sont difficilement utilisables à l'intérieur de modèles numériques. Enfin, cette approche n'est pas proactive mais réactive, car elle se base sur une règle de décision appliquée au moment où le gestionnaire apprend que le débit maximal est atteint au lac.

1.7 Fonctionnement du modèle

Le projet consiste à utiliser les données déjà disponibles pour Alcan de façon à augmenter l'efficacité et la précision des prévisions. Les données disponibles sont incorporées à l'intérieur du modèle de fonte de neige développé. Les données utilisées sont les données météorologiques de température et de précipitation (réelles et prévisions) à trois stations (Figure 4), les quantités de neiges au sol aux stations

nivométriques, les images quotidiennes NOAA-AVHRR et le modèle numérique d'altitude du bassin.

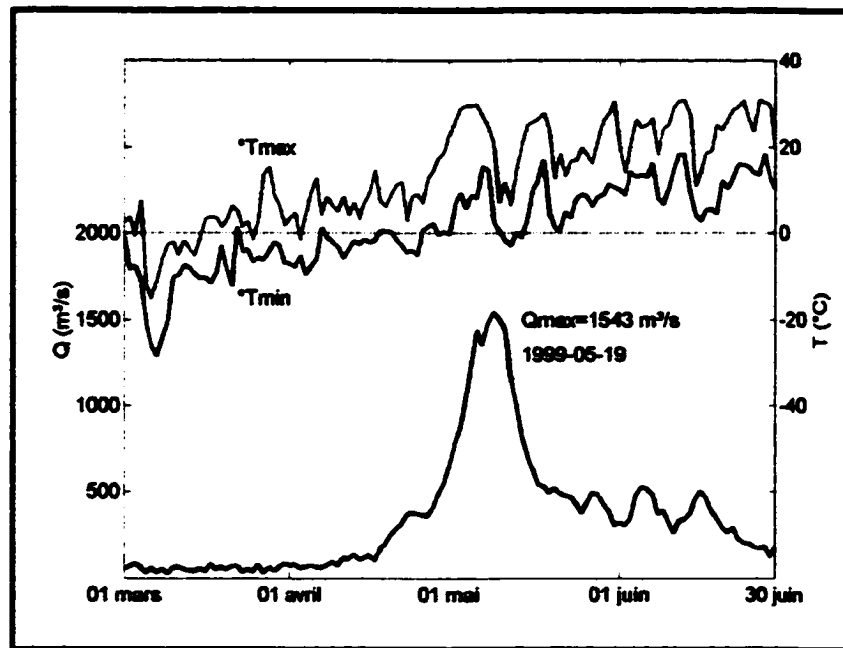


Figure 4 Débit à l'exutoire et température de la station sud du sous-bassin versant de la Chute du Diable pour la saison de fonte 1999

Les données météorologiques proviennent de Alcan qui les recueille directement sur le bassin versant à l'aide de ses équipements. Le modèle numérique d'altitude provient du United States Geological Survey (USGS). Il est d'une précision de 30 secondes d'arc, ce qui représente approximativement une définition de 1 km² et il suit une projection géographique World Geodetic System 1984 (WGS84). Les images NOAA-AVHRR couvrent la période du 28 avril 1999 jusqu'au 15 mai 1999. En l'absence de données disponibles, l'index de végétation est supposé uniforme sur tout le bassin.

La grille de calcul du modèle est à maillage carré d'un kilomètre carré. Cette dimension permet de se conformer le plus possible aux dimensions des données de télédétection et d'altitude.

Une interpolation tenant compte de la latitude et de l'élévation est appliquée aux valeurs de température pour obtenir une matrice de température à la surface du bassin versant. Une interpolation linéaire est appliquée pour l'axe nord-sud entre les stations situées aux extrémités et l'effet d'altitude est inclus via un gradient adiabatique de $0,9^{\circ}\text{C}$ par 100 m d'élévation (McCuen, 1998). Puisque seules les températures journalières minimale et maximale sont disponibles, une variation horaire de température suivant une courbe sinusoïdale est ajustée de façon à rendre les données compatibles avec le pas de temps horaire du modèle. Les températures minimales et maximales sont respectivement fixées à 2h00 et 14h00.

Pour débiter la modélisation, il est nécessaire d'avoir la quantité de neige au sol lors du début de la fonte. Les mesures de neige au sol sont prises mensuellement à quelques stations seulement et les dernières mesures, celles de fin avril, présentent beaucoup de variation entre les stations, résultant du début de la fonte. Pour remédier à ces disparités, le couvert de neige est établi en fonction des mesures prises à la fin du mois de mars, moment pour lequel le couvert de neige semble le plus uniforme sur le bassin. La simulation est donc démarrée environ un mois avant la période de fonte intense, qui a débuté vers la fin du mois d'avril lors de la crue printanière 1999. La matrice de neige est établie selon une interpolation linéaire entre les deux points de lecture situés aux extrémités nord – sud du bassin versant. L'effet d'altitude semble faible selon l'uniformité des données nivométriques en mars et n'a donc pas été tenu en compte. Une vérification entre le couvert de neige modélisé et les données de la fin avril, soit juste avant le début de la fonte active, a permis de valider le couvert de neige au début de la saison de la fonte. À ce moment, la quantité d'équivalent en eau de la neige sur le bassin est d'environ 320 mm.

La valeur de départ du facteur de fonte « k » a été fixée de façon arbitraire selon l'expérience et la connaissance du bassin versant. Une première validation de ce facteur est effectuée lors de l'ajustement du couvert de neige au sol.

Aux fins de cette étude, une simulation en temps réel commençant le 27 avril 99 est réalisée. À ce moment, le modèle utilise le facteur de fonte par défaut pour effectuer les prévisions de fonte. Le 28 avril, une première image NOAA-AVHRR est disponible permettant d'effectuer un premier ajustement du modèle et de produire de nouvelles prévisions. À cette phase de l'étude, seulement la première boucle de l'algorithme (figure 2) est traitée, soit l'ajustement du facteur « k » en fonction de la superficie de neige au sol. Pour ce faire, le modèle est réinitialisé au 30 mars avec une nouvelle valeur pour le facteur de fonte « k » et recommence du début les simulations de fonte. Ce processus recommence itérativement jusqu'à ce que le facteur « k » produise une carte de neige modélisée au 28 avril similaire à la carte de neige provenant de l'image AVHRR de cette même date. À ce moment, le modèle passe en mode prévisionnel et produit des cartes de neige au sol.

Par la suite, d'autres images sont disponibles le 30 avril, le 1^{er} mai et le 2 mai 1999. Le même processus recommence à chaque nouvelle image, soit le calcul d'un nouveau facteur de fonte à partir du 30 mars et la production de prévisions.

1.8 Résultats

Les cartes de neige provenant de la classification NOAA-AVHRR indiquent que la ligne de fonte de neige atteint le milieu du bassin vers le 3 mai 1999 et que la fonte est complétée vers le 7 mai 1999 (Figure 5). Le modèle de fonte de neige, sans ajustement des valeurs de départ, produit un patron de fonte semblable à ce qui est observé sur les images NOAA-AVHRR, mais accuse un retard d'approximativement 4 jours sur la fonte totale. La cause de cet écart peut être due soit par une surestimation des stocks de neige sur le bassin versant ou soit par l'utilisation d'un facteur de fonte trop faible. En intégrant une première image NOAA-AVHRR à la date du 28 avril, le facteur de fonte est graduellement augmenté de sorte que la carte de neige simulée et celle observée soient similaires en terme de superficie enneigée. À partir de cette date, le modèle passe en mode prévisionnel en conservant les nouvelles valeurs établies. La figure 5 présente

les prévisions de fonte du 1^{er} au 7 mai, établies suite à l'acquisition de l'image du 28 avril. On constate une grande amélioration des prévisions puisque le couvert de neige disparaît vers la date réelle, au lieu de 4 jours trop tardivement tel qu'il l'était précédemment. Par contre, la ligne de fonte atteint le milieu du bassin plus rapidement de deux jours.

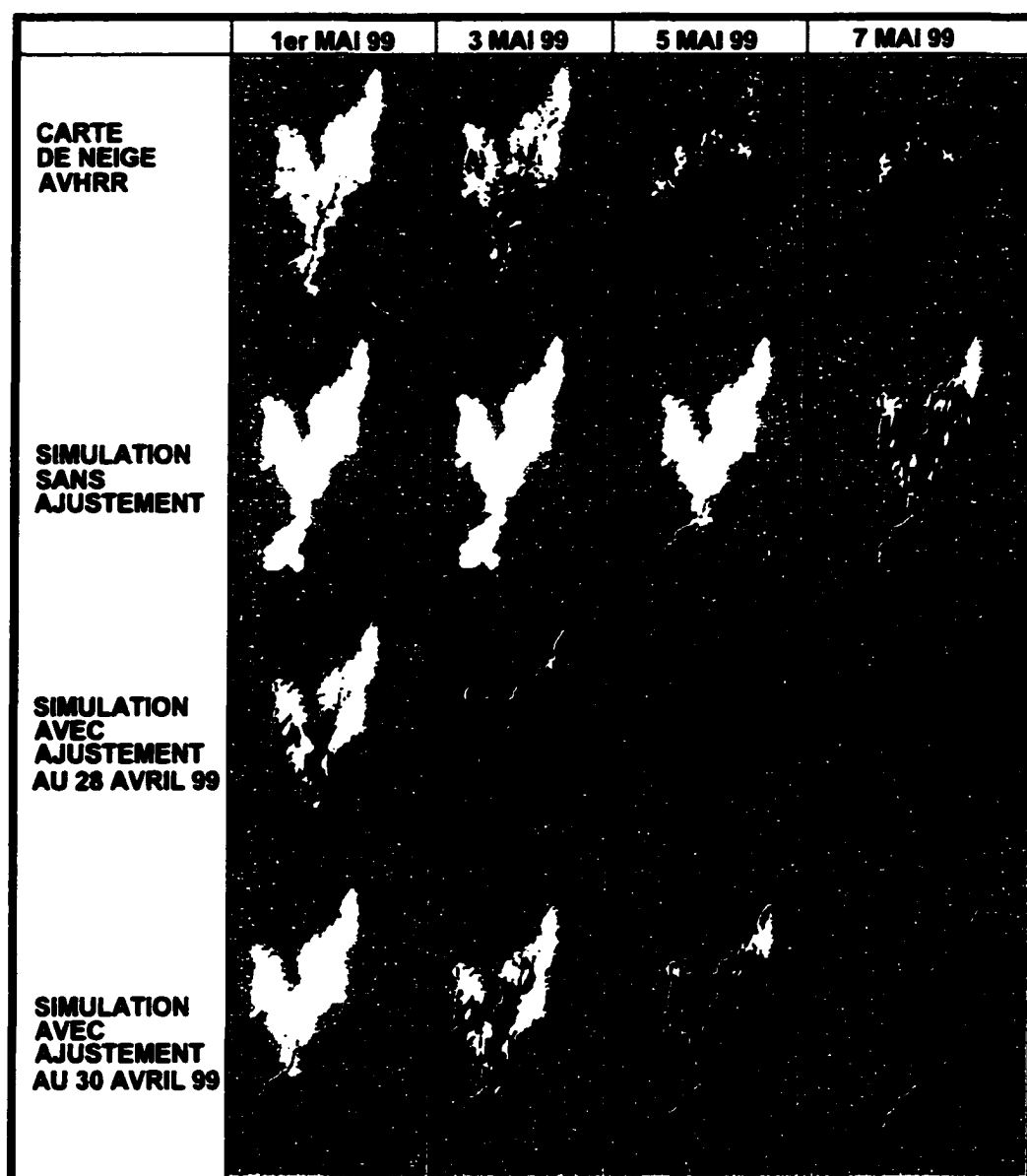


Figure 5 Comparaison des cartes de neige observées et modélisées avec et sans ajustement

La figure 5 présente les cartes de prévision du couvert nival selon que le modèle a été ajusté avec une image NOAA-AVHRR. Les cartes de neige présentées sont celles provenant de la classification des images de télédétection, celles modélisées sans image NOAA-AVHRR et celles qui les utilisent.

1.9 Discussion

Les simulations effectuées dans l'optique d'une gestion en temps réel indiquent que l'approche développée est efficace. Les prévisions convergent rapidement vers la date de fonte réelle dès l'incorporation de la première image NOAA-AVHRR.

En effet, avec seulement une image NOAA-AVHRR, il est possible de réajuster convenablement le modèle en réduisant de beaucoup l'erreur de prévision. La première image est disponible le 28 avril et elle permet d'améliorer les prévisions dont le débit de pointe (règle de la ligne de neige à la mi-bassin) arrive vers le 1^{er} mai ce qui donne un temps de réaction fortement amélioré pour les gestionnaires malgré l'erreur de 2 jours.

L'utilisation d'une deuxième image, soit celle du 30 avril, permet l'obtention de prévision presque identique aux observations, en particulier pour le débit de pointe avec la règle de la ligne de fonte médiane. Cependant, le temps de réaction est plus réduit. Ainsi, en anticipant le débit de pointe (inféré par la ligne de neige à la mi-bassin) avec les prévisions du 28 avril (prévision de la ligne de neige à la mi-bassin au 1^{er} mai), celles au 30 avril permettent de confirmer et d'ajuster les opérations de gestion. L'utilisation de deux images prises au début de la période de fonte permettent, dans ce cas-ci, d'obtenir des prévisions plus précises.

L'ajout redondant d'images NOAA-AVHRR après celle du 30 avril influence très peu les prévisions et aucun gain significatif n'est observé. Une troisième image ne vient que confirmer les prévisions obtenues. La figure 6 présente l'évolution de la prévision de

fonte atteignant la ligne médiane du bassin en fonction de la date d'acquisition d'une image.

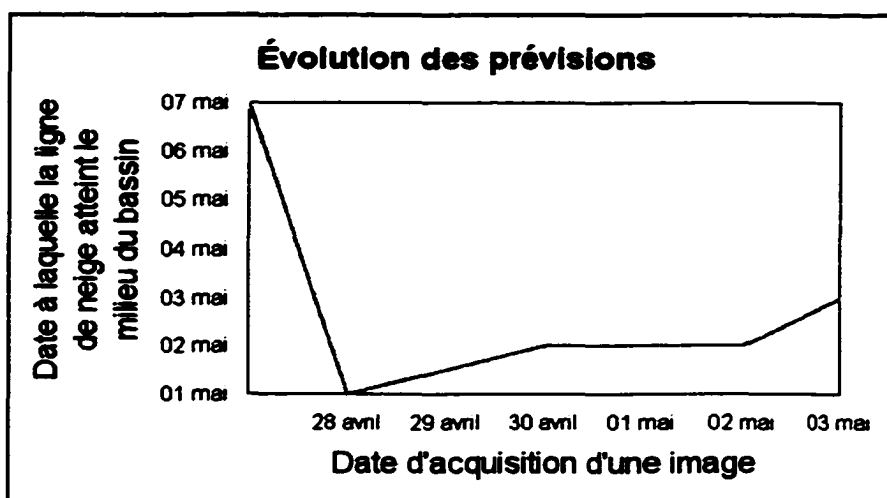


Figure 6 Temps pour lequel la neige atteint la ligne de fonte médiane du bassin versant selon la date d'ajustement

Le processus d'ajustement de la neige au début de la modélisation permet d'estimer le couvert de neige. En l'absence de données de neige, un processus itératif pourrait être utilisé avec deux images NOAA-AVHRR, la première servant à valider le facteur de fonte et la seconde les quantités de neige. Par contre, une multitude de solutions peuvent se présenter. L'expérimentation en ce sens démontrerait sans doute de nouvelles possibilités avec ces images. Pour l'instant, les données de neige sont nécessaires pour bien démarrer le modèle.

Le projet démontre un potentiel intéressant pour ce qui est des gains au niveau économique qu'il procurerait. En effet, puisqu'il permet de produire des prévisions de fonte avec une bonne efficacité, l'optimisation de la production hydroélectrique en serait améliorée. Selon la compagnie Alcan, le coût que représente l'acquisition des images NOAA-AVHRR pour une saison de fonte est largement compensé par les économies réalisées et cela, selon leur mode de gestion actuel, c'est à dire par corrélation visuelle.

De plus, il serait possible de réduire les coûts d'acquisition des images NOAA-AVHRR par l'achat de quelques-unes judicieusement choisies en début de saison de fonte.

La qualité des résultats obtenus est très satisfaisante dans les conditions de la saison de fonte de 1999. Cette saison se caractérisant par une fonte rapide, en moins de 10 jours, permet néanmoins de démontrer un gain substantiel grâce au modèle de fonte. Les résultats seraient potentiellement plus significatifs si la saison de fonte était plus étendue, permettant d'accroître la marge de manœuvre des gestionnaires de plusieurs jours, se traduisant par de plus grandes économies.

1.10 Travaux futurs

Des étapes importantes devront suivre cette étude afin de confirmer le caractère opérationnel de la méthodologie proposée. Tout d'abord, la méthode doit être validée avec une autre saison de fonte sur le même bassin. Ensuite, une transposition de cette approche à un autre bassin versant permettrait d'évaluer les forces et les faiblesses de l'algorithme et ainsi revoir certains aspects s'il y a lieu.

La deuxième partie de l'algorithme, soit l'évaluation et l'ajustement de la distribution spatiale, fera l'objet de validation. Aussi, un module d'optimisation des processus itératifs sera développé afin d'automatiser et d'optimiser les paramètres sujets à être modifié par le modèle.

L'incorporation automatisée des indices de végétation dans le modèle de fonte à partir des données de télédétection NOAA-AVHRR sera évaluée. Aussi, l'élaboration et le jumelage d'un modèle d'écoulement avec le modèle de fonte de neige afin d'éliminer la corrélation visuelle dans la prévision des débits. D'autre part, une étude des possibilités qu'offre l'algorithme sera effectuée pour connaître dans quelle mesure il peut établir, de façon itérative, l'épaisseur de neige au sol avec seulement des images satellitaires. Au

niveau informatique, une interface graphique pour l'utilisateur est à prévoir dans un but de simplicité d'utilisation.

La dernière étape de l'algorithme, celle permettant la validation des prévisions, sera développée et testée. Cette étape a lieu quelques temps après la date de l'image NOAA-AVHRR au moment où le débit modélisé avec cette image atteint l'exutoire. Les débits observés et simulés sont comparés permettant une correction des prévisions restantes à ce moment.

Une analyse économique devra être effectuée aux fins de déterminer les économies que le modèle engendre et des avantages de l'implantation en entreprise. Cette analyse utilisera les années antérieures pour lesquelles les données de modélisation, les coûts et les opérations de gestion sont disponibles pour reproduire les conditions d'exploitation.

1.11 Remerciement

Nous remercions la division Énergie Électrique Québec de la compagnie Alcan pour leur entière collaboration au projet en rendant accessible les informations de leurs bassins versant. Il en est de même pour l'Université du Québec à Chicoutimi, département de géographie, qui a effectué les corrections de projection et le géoréférencement des images AVHRR. Cette recherche est en partie subventionnée par le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG).

CHAPITRE 2

ÉQUATIONS DE MODÉLISATION

Le développement de l'algorithme de fonte de neige a nécessité un ensemble d'équations dans le but de reproduire les différents phénomènes physiques. Les équations importantes du modèle sont présentées au chapitre 1, mais d'autres relations ont été utilisées pour bâtir le modèle. Ce chapitre présente ces équations complémentaires ayant servi au développement de l'algorithme. Les phénomènes représentés par ces équations concernent trois aspects de la modélisation. Tout d'abord, la modélisation de la position du soleil par rapport à la surface de la terre. Ensuite, les détails de calcul du facteur relatif à la pente et à l'inclinaison « K_{sa} ». Finalement, les équations servant à déterminer les quantités de neige et les températures sur le bassin versant. Notons que l'ensemble de ces relations mathématiques ont été adapté en routine de programmation informatique MATLAB tel que présentée à l'annexe 3.

2.1 Positionnement du soleil

Le positionnement du soleil par rapport à la surface de la terre se définit selon les équations générales présentées dans cette section. Comme il est démontré au travers de ces équations, il est primordial de connaître le temps pour lequel la position doit être solutionnée. Pour ce faire, le modèle développé utilise un pas de temps horaire dans le but de permettre une meilleure estimation de la position du soleil. Ainsi, l'algorithme calcul en boucle la position du soleil en fonction du jour et de l'heure du jour. La position du soleil se résume à connaître la valeur de l'angle d'altitude et de l'angle azimut par rapport à un endroit précis sur terre localisé par ces coordonnées longitudes et latitudes. Les équations pour évaluer ces angles sont les suivantes :

Premièrement, l'angle d'altitude (en degrés):

$$\beta = \sin^{-1}([\cos(\text{latitude}) \times \cos(\delta) \times \cos(H)] + [\sin(\text{latitude}) \times \sin(\delta)]) \quad (2.1)$$

Où δ est la déclinaison de la terre en fonction du jour de l'année de telle sorte que:

$$\delta = 23.45 \times \sin\left[\frac{360}{365} \times (284 + \text{jour de l'année})\right] \quad (2.2)$$

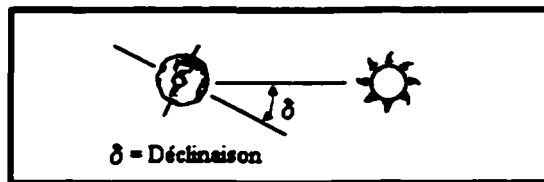


Figure 7 Schéma démontrant la déclinaison de la terre

La variable « H » se définit comme étant l'angle horaire :

$$H = \frac{\text{Minutes avant midi}}{4} \quad (2.3)$$

Précisons que cette équation est valide en utilisant la notation des angles selon le référentiel suivant :

- Angle positif avant midi;

- Angle négatif après midi.

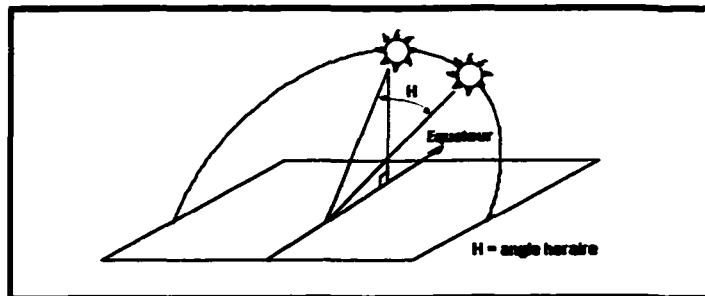


Figure 8 Schéma explicatif de l'angle horaire

Deuxièmement, l'angle azimut solaire (en degrés) se définit selon la relation suivante :

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{[\sin(\beta) \times \sin(\text{latitude})] - \sin(\delta)}{\cos(\beta) \times \cos(\text{latitude})} \right) \quad (2.4)$$

Où les variables β et δ correspondent aux équations définies précédemment.

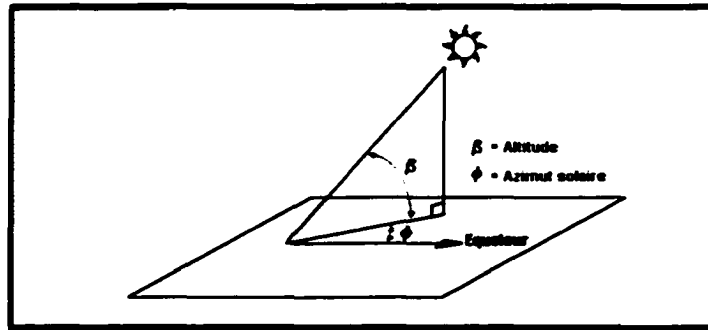


Figure 9 Schéma explicatif de l'angle azimut solaire

2.2 Calcul du facteur « K_{sa} »

La détermination du facteur relié à la pente et à l'inclinaison consiste à établir une relation entre le vecteur normal d'un point du terrain par rapport au vecteur de rayonnement du soleil pour ce point. Tout d'abord, l'angle d'altitude et l'angle d'azimut sont utilisés dans la détermination du vecteur soleil de cette façon :

$$\vec{V}_{\text{soleil}} = [\cos(\beta) \times \sin(\phi), \cos(\beta) \times \cos(\phi), \sin(\beta)] \quad (2.5)$$

Pour ce qui concerne le vecteur normal du terrain, les valeurs sont calculées à l'aide de la fonction *surfnorm* de MATLAB utilisant un ajustement bicubique de la surface. La normale est calculée en utilisant le produit vectoriel et est notée : \vec{V}_{terrain} .

Connaissant les deux vecteurs, l'angle « $\theta_{s/t}$ » est calculé entre \vec{V}_{soleil} et \vec{V}_{terrain} :

$$\theta_{s/t} = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{V}_{\text{soleil}} \cdot \vec{V}_{\text{terrain}}}{|\vec{V}_{\text{soleil}}| |\vec{V}_{\text{terrain}}|} \right) \quad (2.6)$$

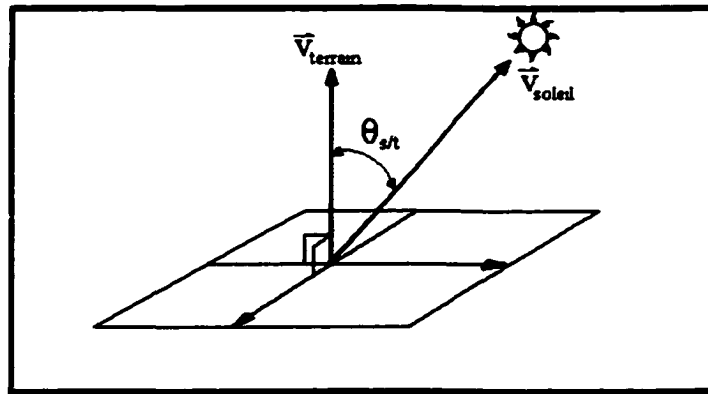


Figure 10 Schéma illustrant l'angle entre le vecteur soleil et le vecteur terrain

Le calcul du facteur « K_{sa} » suit la relation suivante:

$$K_{sa} = B_{\min} + \cos(\theta_{s/t})^2 \times (B_{\max} - B_{\min}) \quad (2.7)$$

Où :

- B_{\min} = borne inférieure de variation du facteur K_{sa} ($B_{\min} = 0.01$)
- B_{\max} = borne supérieure de variation du facteur K_{sa} ($B_{\max} = 1.00$)

2.3 Calcul de la quantité de neige et de la température sur le bassin

Étant donnée l'étendue du bassin versant à l'étude versus la quantité de données disponibles et de sa répartition géographique, une distribution devait être faite. Ainsi, des équations ont servi à attribuer convenablement des valeurs pour chaque élément de la grille de calcul pour les données relative à la quantité de neige au sol et à la température.

La distribution initiale du couvert neigeux sur l'ensemble du bassin versant suit une interpolation linéaire dans l'axe nord-sud en fonction des données de deux stations nivométriques situées aux extrémités du bassin. Seul l'effet de la latitude est considéré selon la relation suivante :

$$Q_i = Q_{sud} + \left(\frac{Q_{nord} - Q_{sud}}{LAT_{nord} - LAT_{sud}} \right) \times (LAT_i - LAT_{sud}) \quad (2.8)$$

Où chacune des variables représente:

- Q_i = quantité de neige sur la cellule à la latitude i
- Q_{sud} = quantité de neige à la station sud du bassin
- Q_{nord} = quantité de neige à la station nord du bassin
- LAT_i = latitude de la cellule
- LAT_{sud} = latitude de la station sud du bassin
- LAT_{nord} = latitude de la station nord du bassin

La distribution initiale de la température sur l'ensemble du bassin versant tient compte de deux facteurs déterminant soit l'altitude et la latitude. La distribution s'effectue selon des interpolations linéaires pour les deux facteurs. L'effet de latitude est considéré selon l'équation suivante :

$$T^{\circ}_{lat, t} = T^{\circ}_{sud, t} + \left(\frac{T^{\circ}_{nord, t} - T^{\circ}_{sud, t}}{LAT_{nord} - LAT_{sud}} \right) \times (LAT_i - LAT_{sud}) \quad (2.9)$$

Où :

- $T^{\circ}_{lat, t}$ = température au temps t à la latitude i
- $T^{\circ}_{sud, t}$ = température à la station sud du bassin au temps t
- $T^{\circ}_{nord, t}$ = température à la station nord du bassin au temps t

$$\begin{aligned}
LAT_i &= \text{latitude de la cellule} \\
LAT_{sud} &= \text{latitude de la station sud du bassin} \\
LAT_{nord} &= \text{latitude de la station nord du bassin}
\end{aligned}$$

Pour ce qui est de l'effet relié à l'altitude, un gradient adiabatique égale à 0.9° par tranche de 100 mètres d'altitude est considéré, valeur comprise dans l'intervalle de valeur suggérée dans la littérature. On a donc la relation suivante :

$$T^{\circ}_{alt,t} = \nabla_{T^{\circ}} \times \Delta_{i,alt} \quad (2.10)$$

Où :

$$\begin{aligned}
T^{\circ}_{alt,t} &= \text{température au temps } t \text{ à l'altitude } i \\
\nabla_{T^{\circ}} &= \text{gradient de température adiabatique} \\
\Delta_{i,alt} &= \text{différentiel d'élévation avec la température de référence}
\end{aligned}$$

Finalement, la relation suivante est utilisée en tenant compte des facteurs précédents :

$$T^{\circ}_{i,t} = T^{\circ}_{lat,i,t} - T^{\circ}_{alt,i,t} \quad (2.10)$$

Ainsi, on obtient la matrice des températures, cellule par cellule, pour l'ensemble du bassin versant à l'étude.

CHAPITRE 3

DONNÉES DE MODÉLISATION

La validation du modèle de fonte de neige a nécessité une multitude de données de provenances diverses. Les données ayant servies à effectuer les simulations avec le modèle de fonte sont regroupées dans le présent chapitre. Ces données représentent essentiellement les conditions géographiques, météorologiques et hydrologiques sur le bassin versant de la Chute du Diable.

3.1 Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain (MNT) provient de la banque de données digitales EROS Data Center du U.S. Geological Survey (USGS). Plus spécifiquement, le MNT est extrait du GTOPO30, une base de données couvrant l'ensemble du globe terrestre. Voici les caractéristiques principales du MNT :

Résolution : grille horizontale de 30 secondes d'arc, soit environ 1 km.

Précision verticale: ± 30 mètres avec une erreur linéaire à 90% de confiance.

Projection géographique : WGS84

Couverture de la matrice de données utilisée :

Latitude : 0° à 90° nord

Longitude : 60° à 100° ouest

Format de données : entier signé 16-bits

La figure 11 présente sous forme graphique le modèle numérique de terrain utilisé pour le sous-bassin versant de la Chute du Diable.

3.2 Stations météorologiques

Les tableaux II à IV présentent les valeurs provenant de la base de données de Alcan

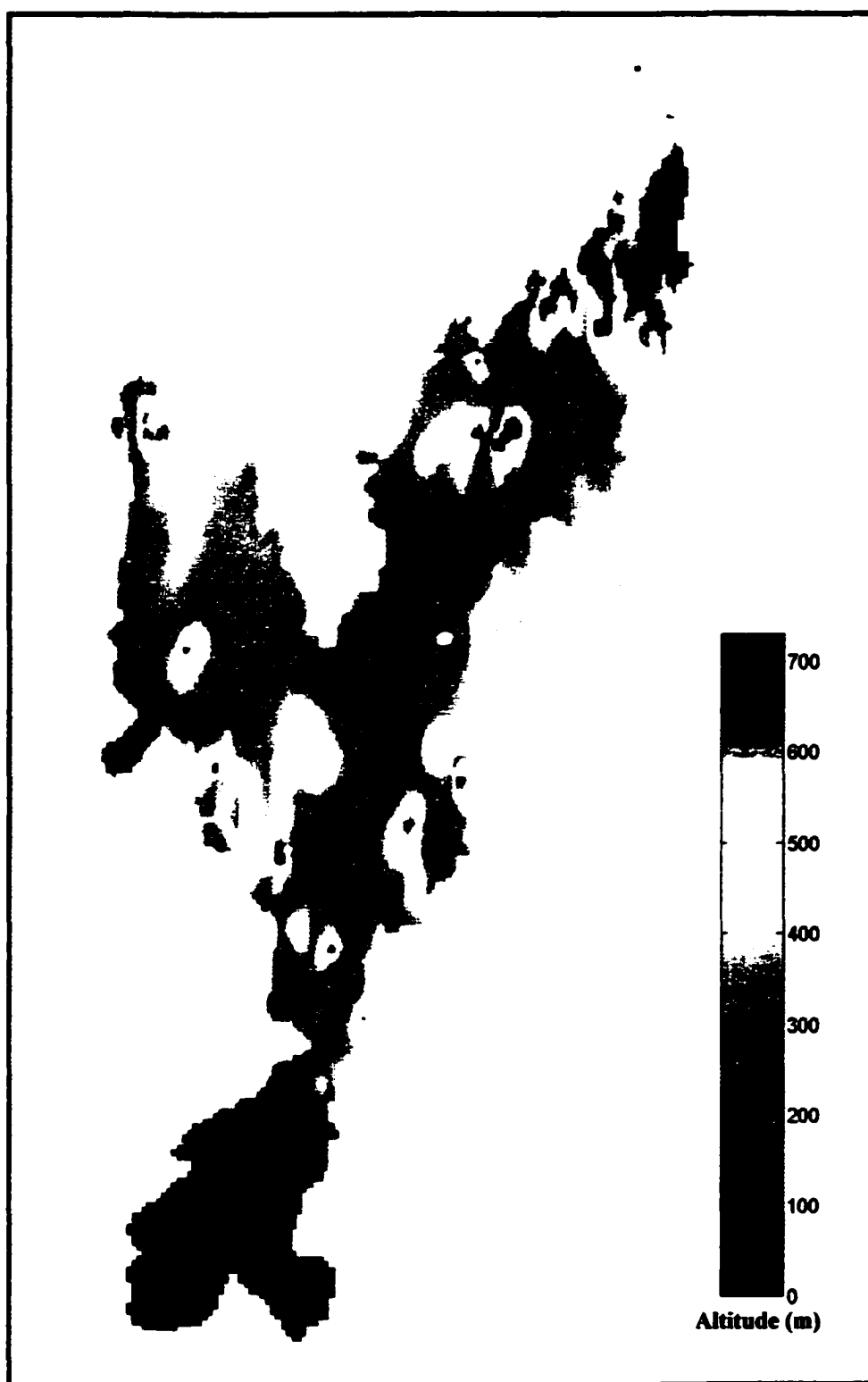


Figure 11 Représentation graphique du modèle numérique de terrain

pour les trois stations météorologiques dans le bassin versant de la Chute du Diable. Les valeurs consistent à la température maximale et minimale journalière et de la quantité de précipitation pour les mois de mars à mai 1999.

Tableau II

Données de la station météorologique Chute du Diable

| Chute du Diable | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|----|
| Station météorologique | | | | | | | | | | |
| id : 7061560 longitude: 71° 42' 00 | | | | | | | | | | |
| élévation: 174 m latitude: 48° 45' 00 | | | | | | | | | | |
| MARS | | | | AVRIL | | | MAI | | | |
| | T° max (°C) | T° min (°C) | Précipitation (mm) | T° max (°C) | T° min (°C) | Précipitation (mm) | T° max (°C) | T° min (°C) | Précipitation (mm) | |
| Jour | 1 | 2.5 | -0.4 | 1 | 3.4 | -7.1 | 0 | 22.6 | -0.3 | 0 |
| | 2 | 3.8 | -8.5 | 9 | 4.8 | -7.8 | 0 | 25.7 | 6.6 | 0 |
| | 3 | -0.9 | -7.7 | 0 | -1.6 | -5.4 | 9 | 28.9 | 9.2 | 0 |
| | 4 | 7.7 | -10.8 | 26 | 4 | -9.7 | 2 | 29.6 | 5.8 | 0 |
| | 5 | -12 | -20.8 | 1 | 9.5 | -7.8 | 0 | 29.5 | 8.7 | 0 |
| | 6 | -15.2 | -26.1 | 0 | 12.9 | -6.2 | 0 | 29.8 | 8 | 0 |
| | 7 | -11.2 | -28.4 | 1 | 4.1 | 1.1 | 10 | 27.2 | 15.4 | 0 |
| | 8 | -6.3 | -24.7 | 1 | 8.4 | -0.8 | 0 | 24.5 | 14.5 | 1 |
| | 9 | -2.7 | -20.8 | 0 | 6.3 | -2.1 | 0 | 20.5 | 2.6 | 1 |
| | 10 | -2 | -10.4 | 0 | 4.9 | -3.3 | 0 | 7 | 0.4 | 0 |
| | 11 | -5.4 | -9.8 | 7 | 8.5 | -5.8 | 0 | 11.7 | -1.8 | 0 |
| | 12 | -1.8 | -7.6 | 3 | 4.1 | -3.9 | 0 | 6.3 | -2.9 | 0 |
| | 13 | -3.7 | -8.1 | 1 | 7 | -1.9 | 0 | 14.8 | 0 | 0 |
| | 14 | -5.3 | -9.5 | 1 | 3.1 | -2.6 | 1 | 20.5 | -1.1 | 0 |
| | 15 | -1.3 | -10.6 | 0 | 7.1 | -1.6 | 0 | 25.1 | 3.2 | 0 |
| | 16 | 3.3 | -10.5 | 0 | 9.4 | -2.2 | 0 | 25.8 | 10.1 | 0 |
| | 17 | 3.8 | -11.6 | 0 | 14.7 | -1.7 | 0 | 26.5 | 12.2 | 0 |
| | 18 | 3.4 | -9.5 | 0 | 7.4 | 0.4 | 0 | 27.9 | 16.9 | 0 |
| | 19 | 1.3 | -3.1 | 0 | 6.1 | 0.5 | 0 | 23.5 | 4.5 | 9 |
| | 20 | 3 | -8.4 | 0 | 9 | 0.2 | 0 | 12.4 | 1.3 | 0 |
| | 21 | 6.2 | -12.3 | 0 | 11.3 | -1.7 | 0 | 18.5 | 0.3 | 0 |
| | 22 | 5.1 | 1.3 | 3 | 11.7 | -3 | 1 | 13.1 | 4.9 | 2 |
| | 23 | 1.6 | -4.4 | 1 | 2.8 | -4.6 | 0 | 16.8 | 3.5 | 0 |
| | 24 | 2.7 | -4 | 0 | 8.4 | -4.1 | 0 | 16.8 | 7.9 | 12 |
| | 25 | -1.6 | -6.8 | 1 | 9 | -5.1 | 1 | 19.8 | 9.1 | 10 |
| | 26 | 2.9 | -5.8 | 0 | 6.8 | 0.7 | 1 | 17.9 | 8.2 | 0 |
| | 27 | 13.6 | -6.3 | 0 | 12.9 | 1.5 | 0 | 16.1 | 6.1 | 0 |
| | 28 | 15.3 | -4.3 | 0 | 14.4 | 2.2 | 0 | 21.5 | 8.4 | 0 |
| | 29 | 8.8 | -2.2 | 0 | 17.5 | -0.4 | 0 | 26.1 | 8.8 | 0 |
| | 30 | 6.4 | -3.1 | 1 | 18.8 | 0.3 | 0 | 27.8 | 11.4 | 0 |
| | 31 | 1.7 | -7.1 | 0 | | | | 30.6 | 10.4 | 0 |

Tableau III

Données de la station météorologique Chute des Passes

| Chute des Passes | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|--------------------|--------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|----|--|
| Station météorologique | | | | | | | | | | |
| id : 7061541 longitude: 71° 15' 00 | | | | | | | | | | |
| élévation: 399 m latitude: 49° 54' 00 | | | | | | | | | | |
| MARS | | | AVRIL | | | MAI | | | | |
| T° max (°C) | T° min (°C) | Précipitation (mm) | T° max (°C) | T° min (°C) | Précipitation (mm) | T° max (°C) | T° min (°C) | Précipitation (mm) | | |
| 1 | 1.4 | -2.8 | 4 | 1.8 | -13.9 | 0.1 | 15.4 | -1 | 0 | |
| 2 | 2.2 | -10 | 11 | 1.7 | -15 | 0 | 22 | 3.7 | 0 | |
| 3 | -6.5 | -11.3 | 2 | -1.1 | -10.1 | 0 | 26.3 | 1.4 | 0 | |
| 4 | 2.2 | -11 | 22 | 2.1 | -11.4 | 0 | 26.5 | 0.7 | 0 | |
| 5 | -12.4 | -23 | 2 | 7.1 | -8.3 | 0 | 27.4 | 1 | 0 | |
| 6 | -16.2 | -27.1 | 2 | 10.3 | -6.4 | 0 | 26.7 | 1 | 0 | |
| 7 | -13.4 | -32.5 | 0 | 4.3 | 0.3 | 4 | 24.8 | 5.7 | 0 | |
| 8 | -9.1 | -23.9 | 0 | 6.9 | -1.2 | 1 | 22.6 | 12.9 | 1 | |
| 9 | -4.9 | -19.6 | 0 | 1.3 | -3.3 | 0 | 19.1 | 0.5 | 3 | |
| 10 | -2.9 | -12.5 | 0 | 3.6 | -6.1 | 1 | 4.1 | -2.1 | 1 | |
| 11 | 2.1 | -9.6 | 9 | 4.1 | -4.6 | 0 | 7 | -3.3 | 0 | |
| 12 | 2.3 | -1.7 | 10 | 1.3 | -5.9 | 0 | 0.8 | -3.4 | 0 | |
| 13 | -2.7 | -8.7 | 0 | 3.2 | -4.5 | 1 | 10.7 | -1.9 | 0 | |
| 14 | -3.2 | -10.2 | 3 | 3.3 | -4.2 | 1 | 16.9 | 0 | 0 | |
| 15 | -0.6 | -8 | 1 | 4.8 | -2.3 | 0 | 22.5 | -0.9 | 0 | |
| 16 | -2.7 | -12.8 | 1 | 10.7 | -2.4 | 1 | 25.2 | 3.5 | 0 | |
| 17 | -1 | -11.6 | 0 | 9.6 | 0 | 0 | 25.5 | 7.6 | 0 | |
| 18 | 2.3 | -39.1 | 1 | 7.4 | 1.4 | 0 | 27.3 | 12 | 0 | |
| 19 | -1.4 | -5 | 0 | 7.5 | 1.2 | 0 | 23.7 | 5.6 | 13 | |
| 20 | 4.3 | -6.6 | 0 | 5.4 | 0.8 | 1 | 10.3 | 1.1 | 1 | |
| 21 | 3.9 | -7.4 | 0 | 8.2 | -0.2 | 0 | 17.1 | -0.3 | 0 | |
| 22 | 1 | -22.4 | 2 | 8 | -5.7 | 3 | 14.4 | 2.5 | 9 | |
| 23 | 0.6 | -6.1 | 1 | -1.4 | -7.8 | 1 | 13.5 | 0.8 | 0 | |
| 24 | 0.3 | -4.5 | 6 | 4.9 | -5.5 | 0 | 10.6 | 7.4 | 6 | |
| 25 | -2.6 | -7.8 | 1 | 6.5 | -4.8 | 0 | 14.6 | 7.6 | 25 | |
| 26 | 3 | -6.2 | 0 | 6.3 | 0.4 | 0 | 14.4 | 6.8 | 1 | |
| 27 | 11.1 | -6.6 | 0 | 10.5 | 0.1 | 0 | 15.1 | 3.6 | 0 | |
| 28 | 15.6 | -5.8 | 0 | 10.8 | 0.6 | 0 | 18.7 | 4.7 | 0 | |
| 29 | 7.4 | -3 | 6 | 13.2 | 0 | 0 | 24.7 | 4.2 | 0 | |
| 30 | 3.8 | -7.3 | 2 | 16.7 | 0.5 | 0 | 23.5 | 6.8 | 0 | |
| 31 | -1.1 | -10.7 | 0 | | | | 27.9 | 5.5 | 1 | |

Tableau IV

Données de la station météorologique Manouane Est

| Manouane Est | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|--------------------|----|
| Station météorologique | | | | | | | | | |
| id : 62201 longitude: 70° 31' 58 | | | | | | | | | |
| élévation: 496 m latitude: 50° 39' 23 | | | | | | | | | |
| MARS | | | AVRIL | | | MAI | | | |
| T° max (°C) | T° min (°C) | Précipitation (mm) | T° max (°C) | T° min (°C) | Précipitation (mm) | T° max (°C) | T° min (°C) | Précipitation (mm) | |
| 1 | 0 | -5 | 0 | 2.2 | -20.9 | 0 | 12.7 | -2.9 | 0 |
| 2 | 3 | -9 | 5 | 1 | -23.8 | 0 | 19 | -4.5 | 0 |
| 3 | -7.9 | -14.7 | 2 | -1.1 | -16.1 | 0 | 24.1 | -0.8 | 0 |
| 4 | 1.9 | -13.9 | 28 | 0.1 | -13.1 | 0 | 24.1 | -1.8 | 0 |
| 5 | -12 | -26.8 | 4 | 4.5 | -15.6 | 0 | 24 | 0.3 | 0 |
| 6 | -17.4 | -33.9 | 1 | 12.7 | -11.3 | 0 | 25.4 | -0.7 | 0 |
| 7 | -15.2 | -39.1 | 0 | 3.7 | -1.5 | 1 | 24.5 | 3.3 | 0 |
| 8 | -9.9 | -33.4 | 0 | 5.6 | -1.2 | 1 | 19.9 | 9.2 | 1 |
| 9 | -8.7 | -26.5 | 0 | 1.1 | -5.2 | 0 | 17.3 | -0.8 | 0 |
| 10 | -2.1 | -13.3 | 0 | 2.1 | -8.4 | 1 | 2.8 | -3.6 | 3 |
| 11 | 1.7 | -10.3 | 1 | 2.2 | -9.4 | 1 | 3.1 | -3.9 | 0 |
| 12 | 3.1 | -4 | 4 | -1.7 | -6.8 | 0 | -0.6 | -5.1 | 1 |
| 13 | -2.8 | -9.4 | 1 | 1.8 | -5.4 | 1 | 5.9 | -2.9 | 0 |
| 14 | -2 | -11.4 | 4 | 5.1 | -2.8 | 0 | 13.8 | -4 | 0 |
| 15 | 0.4 | -12.4 | 2 | 6.1 | -5.7 | 1 | 20.5 | -3.2 | 0 |
| 16 | -0.9 | -13.5 | 1 | 11.5 | -7.8 | 0 | 25.1 | 1.7 | 0 |
| 17 | -2 | -12.5 | 0 | 7.3 | -5.5 | 0 | 25 | 3.9 | 0 |
| 18 | 0 | -7.7 | 0 | 7.1 | 0.4 | 0 | 22.4 | 12.8 | 0 |
| 19 | -1.4 | -11.4 | 1 | 7.9 | 0.1 | 0 | 25.9 | 5.2 | 5 |
| 20 | 4.1 | -12.2 | 0 | 4.8 | -0.3 | 1 | 8.7 | 1.1 | 5 |
| 21 | 5.9 | -15.3 | 0 | 9.6 | -1.7 | 0 | 15.5 | -0.9 | 0 |
| 22 | 2.2 | -3.7 | 0 | 8.4 | -5.6 | 3 | 10.8 | 2 | 15 |
| 23 | -0.6 | -6.6 | 2 | -3.5 | -7.8 | 3 | 11.9 | 2.9 | 1 |
| 24 | 1.1 | -6.5 | 2 | 3 | -6.2 | 0 | 14 | 4.6 | 6 |
| 25 | -2.5 | -8.2 | 2 | 6.6 | -2.3 | 0 | 11.1 | 7.2 | 12 |
| 26 | 3.8 | -10.7 | 1 | 6.2 | -2.5 | 0 | 13.2 | 5.5 | 3 |
| 27 | 10.8 | -12.3 | 0 | 10.7 | -3 | 1 | 14.4 | 1.2 | 0 |
| 28 | 19.2 | -10.2 | 0 | 9.4 | -5.2 | 0 | 17.2 | -0.1 | 1 |
| 29 | 12.4 | -6.8 | 2 | 11.3 | -1.7 | 0 | 22.5 | 2.8 | 0 |
| 30 | 3.9 | -7.8 | 2 | 16.7 | -3.6 | 0 | 18.8 | 1.9 | 1 |
| 31 | -4.2 | -16.9 | 1 | | | | 25.9 | 3.3 | 0 |

3.3 Stations nivométriques

L'information concernant la quantité de neige au sol provient de la base de données de Alcan. Les stations nivométriques visées sont celles situées dans le bassin versant de la Chute du Diable et dans le voisinage immédiat (stations ombrées dans les tableaux). Le tableau V présente les informations relatives à ces stations alors que le tableau VI indique les épaisseurs de neige au sol.

Tableau V

Caractéristiques des stations nivométriques

| Station nivométrique | Id | Latitude | Longitude | Élévation (m) |
|----------------------|---------|------------|------------|---------------|
| Lac Manouane | 0622060 | 50° 39' 00 | 70° 32' 00 | 495 |
| Passe Dangereuse | 0622040 | 49° 53' 00 | 71° 16' 00 | 393 |
| Rivière Serpent | 0622030 | 49° 42' 00 | 71° 22' 00 | 325 |

Tableau VI

Données de neige au sol pour les mois de mars et avril 1999

| Station nivométrique | Fin mars | | | Fin avril | | |
|----------------------|------------|------------------------------------|-------------|------------|------------------------------------|-------------|
| | Date | Épaisseur d'équivalent en eau (cm) | Densité (%) | Date | Épaisseur d'équivalent en eau (cm) | Densité (%) |
| Lac Manouane | 1999-03-30 | 32,8 | 26,7 | 1999-04-27 | 26,0 | 34,9 |
| Passe Dangereuse | 1999-03-29 | 33,2 | 26,3 | 1999-04-26 | 30,0 | 33,7 |
| Rivière Serpent | 1999-03-29 | 38,4 | 24,7 | 1999-04-26 | 34,4 | 35,6 |

3.4 Prévisions météorologiques

Le tableau VII présente les prévisions météorologiques pour une période de sept jours pour le bassin versant de la Chute du Diable. Les renseignements provenant de la base de données de Alcan consistent en les prévisions de température maximale et minimale journalière et de la quantité de précipitation pour la période de fonte de la neige.

Tableau VII

Prévision météorologique 7 jours (1^{ère} partie)

| Date | Jour 1 | | | Jour 2 | | | Jour 3 | | | Jour 4 | | |
|------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| | T ^{max} (°C) | T ^{min} (°C) | Précipitation (mm) | T ^{max} (°C) | T ^{min} (°C) | Précipitation (mm) | T ^{max} (°C) | T ^{min} (°C) | Précipitation (mm) | T ^{max} (°C) | T ^{min} (°C) | Précipitation (mm) |
| 1999-04-20 | 5,4 | -3,2 | 0,0 | 6,8 | -5,2 | 2,8 | 2,0 | -2,8 | 1,8 | -2,5 | -5,0 | 1,6 |
| 1999-04-21 | 7,1 | -4,7 | 0,1 | 4,2 | -3,8 | 1,3 | -1,0 | -3,9 | 1,1 | -0,5 | -4,6 | 1,6 |
| 1999-04-22 | 3,7 | -4,0 | 2,5 | 0,5 | -3,9 | 1,3 | 1,4 | -3,1 | 1,1 | 2,1 | -1,5 | 1,4 |
| 1999-04-23 | 0,3 | -4,6 | 2,3 | 2,8 | -1,9 | 0,5 | 1,3 | -2,1 | 2,6 | 2,9 | -0,7 | 2,4 |
| 1999-04-24 | 2,7 | -3,2 | 0,1 | 1,7 | -5,3 | 2,4 | 1,0 | -2,4 | 1,5 | 3,9 | -1,3 | 1,2 |
| 1999-04-25 | 3,1 | -4,2 | 1,3 | 3,7 | -2,4 | 1,0 | 3,4 | -3,8 | 0,2 | 4,2 | -1,2 | 0,4 |
| 1999-04-26 | 4,6 | -2,4 | 1,3 | 5,7 | -3,3 | 0,0 | 3,3 | -4,4 | 0,4 | 4,4 | -1,2 | 0,0 |
| 1999-04-27 | 6,4 | -2,5 | 0,0 | 5,9 | -4,0 | 0,0 | 5,2 | -3,5 | 0,0 | 7,1 | 0,0 | 0,2 |
| 1999-04-28 | 7,6 | -3,1 | 0,0 | 7,1 | -3,6 | 0,0 | 7,8 | -2,3 | 0,0 | 4,5 | -0,2 | 0,3 |
| 1999-04-29 | 8,9 | -2,6 | 0,0 | 10,5 | -1,1 | 0,0 | 7,1 | 0,7 | 0,4 | 5,7 | -1,0 | 1,2 |
| 1999-04-30 | 12,6 | 1,1 | 0,0 | 9,4 | -0,9 | 0,0 | 9,5 | -1,1 | 0,5 | 12,7 | 6,2 | 0,8 |
| 1999-05-01 | 11,4 | 1,4 | 0,0 | 16,9 | 1,3 | 0,0 | 14,2 | 4,4 | 0,2 | 15,4 | 4,4 | 0,0 |
| 1999-05-02 | 18,7 | 2,8 | 0,0 | 21,4 | 4,1 | 0,0 | 15,7 | 3,8 | 0,0 | 15,3 | 4,6 | 0,2 |
| 1999-05-03 | 22,7 | 5,5 | 0,0 | 22,5 | 4,4 | 0,0 | 17,6 | 5,3 | 0,0 | 16,2 | 9,8 | 0,5 |
| 1999-05-04 | 24,7 | 7,0 | 0,0 | 23,7 | 8,3 | 0,0 | 18,3 | 8,4 | 0,0 | 18,1 | 9,5 | 0,0 |
| 1999-05-05 | 24,8 | 10,2 | 0,0 | 24,3 | 9,1 | 0,0 | 18,1 | 10,6 | 0,2 | 15,5 | 13,4 | 6,1 |
| 1999-05-06 | 24,8 | 10,4 | 0,0 | 24,2 | 11,6 | 0,0 | 15,8 | 13,5 | 9,2 | 17,3 | 14,1 | 10,1 |
| 1999-05-07 | 23,6 | 14,4 | 0,0 | 21,1 | 14,7 | 8,0 | 16,3 | 12,9 | 9,7 | 13,4 | 8,2 | 3,1 |
| 1999-05-08 | 23,8 | 15,1 | 3,2 | 17,1 | 9,9 | 15,3 | 8,8 | 4,8 | 1,0 | 5,6 | 3,0 | 1,7 |
| 1999-05-09 | 19,6 | 8,4 | 9,0 | 9,7 | 3,1 | 0,0 | 4,4 | 1,9 | 1,4 | 7,4 | 4,1 | 2,2 |
| 1999-05-10 | 6,5 | 2,0 | 0,1 | 5,3 | -0,8 | 0,1 | 1,7 | -0,5 | 2,3 | 6,4 | 1,5 | 2,0 |
| 1999-05-11 | 5,8 | -1,4 | 0,2 | 2,9 | -2,3 | 0,7 | 7,9 | 1,3 | 0,6 | 8,6 | 4,8 | 1,0 |
| 1999-05-12 | 0,9 | -3,4 | 1,4 | 10,9 | -0,3 | 0,1 | 6,9 | -0,6 | 0,0 | 10,8 | 0,4 | 0,0 |
| 1999-05-13 | 9,8 | -0,7 | 0,0 | 12,9 | -2,0 | 0,0 | 9,7 | -2,5 | 0,0 | 12,1 | 2,0 | 0,9 |
| 1999-05-14 | 14,2 | -1,8 | 0,0 | 17,2 | -0,8 | 0,0 | 13,7 | 1,5 | 0,1 | 13,6 | 6,7 | 1,0 |
| 1999-05-15 | 18,1 | 1,4 | 0,0 | 21,0 | 4,3 | 0,0 | 11,4 | 8,0 | 3,8 | 14,0 | 9,9 | 8,6 |
| 1999-05-16 | 22,3 | 5,7 | 0,0 | 20,8 | 9,0 | 1,2 | 17,4 | 12,2 | 0,9 | 18,5 | 12,5 | 0,9 |
| 1999-05-17 | 23,5 | 10,6 | 0,0 | 24,2 | 14,0 | 0,0 | 18,4 | 11,2 | 8,2 | 13,0 | 9,4 | 0,7 |
| 1999-05-18 | 25,9 | 16,1 | 0,2 | 24,9 | 13,3 | 4,0 | 10,8 | 7,4 | 0,8 | 15,2 | 9,5 | 1,8 |
| 1999-05-19 | 25,3 | 12,9 | 12,5 | 14,0 | 8,5 | 0,1 | 11,7 | 7,8 | 6,6 | 15,3 | 9,5 | 17,6 |
| 1999-05-20 | 10,1 | 6,7 | 0,1 | 17,7 | 5,4 | 0,1 | 12,1 | 9,9 | 10,6 | 13,7 | 10,8 | 4,2 |

Tableau VII

Prévision météorologique 7 jours (2^{ème} partie)

| Date | Jour 5 | | | Jour 6 | | | Jour 7 | | |
|------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| | T ^{max} (°C) | T ^{min} (°C) | Précipitation (mm) | T ^{max} (°C) | T ^{min} (°C) | Précipitation (mm) | T ^{max} (°C) | T ^{min} (°C) | Précipitation (mm) |
| 1999-04-20 | -2,0 | -5,5 | 0,8 | 2,1 | -3,8 | 0,6 | 2,6 | -0,4 | 2,6 |
| 1999-04-21 | 1,6 | -2,4 | 0,8 | 3,4 | -0,7 | 0,8 | 4,4 | 0,2 | 0,9 |
| 1999-04-22 | 3,8 | -1,0 | 0,9 | 4,2 | -0,5 | 0,5 | 5,0 | 0,6 | 0,5 |
| 1999-04-23 | 3,6 | -0,8 | 1,0 | 4,3 | 0,4 | 0,6 | 6,0 | 1,6 | 0,6 |
| 1999-04-24 | 4,3 | -0,9 | 1,2 | 3,6 | -1,0 | 0,6 | 2,9 | -1,2 | 0,6 |
| 1999-04-25 | 3,2 | -0,8 | 0,7 | 3,6 | -1,5 | 0,5 | 4,5 | -1,1 | 0,3 |
| 1999-04-26 | 5,6 | -0,5 | 0,4 | 4,8 | 0,9 | 0,4 | 6,1 | 0,1 | 0,5 |
| 1999-04-27 | 5,3 | -0,8 | 0,7 | 4,6 | -1,8 | 0,2 | 7,6 | 1,9 | 1,2 |
| 1999-04-28 | 4,5 | -1,0 | 0,3 | 8,8 | 1,5 | 0,6 | 9,8 | 3,6 | 0,9 |
| 1999-04-29 | 11,0 | 4,6 | 0,9 | 12,4 | 6,7 | 1,1 | 12,9 | 8,5 | 1,0 |
| 1999-04-30 | 13,8 | 5,8 | 0,3 | 14,1 | 5,6 | 1,3 | 13,7 | 8,6 | 1,0 |
| 1999-05-01 | 14,9 | 4,8 | 1,1 | 11,3 | 8,3 | 2,0 | 10,7 | 6,4 | 5,1 |
| 1999-05-02 | 13,5 | 8,1 | 0,8 | 13,7 | 8,2 | 1,2 | 9,8 | 7,5 | 2,9 |
| 1999-05-03 | 15,5 | 8,9 | 0,2 | 15,5 | 8,0 | 0,4 | 14,9 | 7,0 | 0,3 |
| 1999-05-04 | 16,9 | 11,6 | 1,9 | 14,6 | 11,3 | 3,5 | 12,1 | 9,3 | 6,1 |
| 1999-05-05 | 16,7 | 13,0 | 1,0 | 12,9 | 4,2 | 3,8 | 5,9 | 2,9 | 3,4 |
| 1999-05-06 | 16,6 | 13,1 | 3,2 | 14,6 | 12,1 | 6,8 | 15,7 | 12,8 | 2,6 |
| 1999-05-07 | 11,0 | 7,7 | 2,8 | 13,5 | 9,1 | 1,5 | 13,1 | 9,8 | 5,3 |
| 1999-05-08 | 4,9 | 2,4 | 1,2 | 9,6 | 4,3 | 0,3 | 10,9 | 9,2 | 3,5 |
| 1999-05-09 | 9,0 | 5,0 | 0,7 | 10,1 | 7,7 | 2,9 | 12,1 | 9,5 | 3,1 |
| 1999-05-10 | 9,8 | 5,4 | 1,8 | 11,4 | 7,9 | 2,1 | 13,1 | 10,5 | 1,7 |
| 1999-05-11 | 10,8 | 4,8 | 0,1 | 12,7 | 6,0 | 0,9 | 13,7 | 8,7 | 0,6 |
| 1999-05-12 | 11,8 | 2,3 | 1,0 | 13,4 | 6,2 | 3,5 | 12,6 | 9,6 | 3,2 |
| 1999-05-13 | 13,1 | 7,6 | 2,9 | 9,7 | 4,8 | 6,1 | 9,2 | 5,2 | 5,9 |
| 1999-05-14 | 12,7 | 8,7 | 5,2 | 15,4 | 9,6 | 6,1 | 12,9 | 7,6 | 5,6 |
| 1999-05-15 | 17,6 | 10,9 | 2,4 | 14,8 | 11,1 | 8,5 | 15,9 | 7,9 | 1,4 |
| 1999-05-16 | 17,8 | 12,1 | 6,9 | 14,6 | 10,6 | 1,0 | 13,1 | 7,7 | 3,0 |
| 1999-05-17 | 13,0 | 8,9 | 4,8 | 14,0 | 7,7 | 17,6 | 7,9 | 6,7 | 6,9 |
| 1999-05-18 | 14,5 | 12,1 | 16,6 | 15,2 | 11,4 | 18,7 | 13,3 | 10,9 | 4,0 |
| 1999-05-19 | 11,8 | 7,6 | 2,6 | 12,7 | 8,8 | 0,6 | 12,5 | 9,6 | 16,2 |
| 1999-05-20 | 14,3 | 11,1 | 1,7 | 16,3 | 13,2 | 9,3 | 16,9 | 13,5 | 5,5 |

3.5 Apports au Lac St-Jean

Le tableau VIII et la figure 12 présente les valeurs de débit enregistrées au Lac St-Jean en provenance du bassin versant de la Chute du Diable. Ces informations proviennent également de la base de données de Alcan et couvrent les mois de mars à juin.

Tableau VIII

Apport journalier du bassin versant de la Chute du Diable au Lac St-Jean

| | | Débit (m ³ /s) | | | |
|------|----|---------------------------|-----|------|------|
| | | MARS | AVR | MAI | JUIN |
| Jour | 1 | 53 | 75 | 643 | 323 |
| | 2 | 71 | 81 | 778 | 308 |
| | 3 | 84 | 61 | 863 | 346 |
| | 4 | 63 | 65 | 1039 | 477 |
| | 5 | 31 | 73 | 1247 | 525 |
| | 6 | 61 | 66 | 1435 | 514 |
| | 7 | 31 | 61 | 1354 | 483 |
| | 8 | 52 | 76 | 1482 | 372 |
| | 9 | 28 | 94 | 1543 | 393 |
| | 10 | 63 | 75 | 1500 | 323 |
| | 11 | 65 | 116 | 1441 | 261 |
| | 12 | 52 | 112 | 1150 | 337 |
| | 13 | 45 | 140 | 997 | 341 |
| | 14 | 41 | 108 | 816 | 374 |
| | 15 | 58 | 118 | 702 | 460 |
| | 16 | 40 | 135 | 631 | 499 |
| | 17 | 85 | 103 | 543 | 463 |
| | 18 | 52 | 172 | 531 | 389 |
| | 19 | 63 | 204 | 493 | 344 |
| | 20 | 52 | 257 | 520 | 297 |
| | 21 | 68 | 287 | 489 | 265 |
| | 22 | 72 | 316 | 476 | 293 |
| | 23 | 38 | 369 | 470 | 227 |
| | 24 | 54 | 382 | 431 | 207 |
| | 25 | 39 | 375 | 379 | 202 |
| | 26 | 78 | 365 | 439 | 181 |
| | 27 | 29 | 366 | 492 | 173 |
| | 28 | 63 | 413 | 487 | 182 |
| | 29 | 42 | 485 | 432 | 128 |
| | 30 | 65 | 547 | 392 | 179 |
| | 31 | 84 | | 306 | |

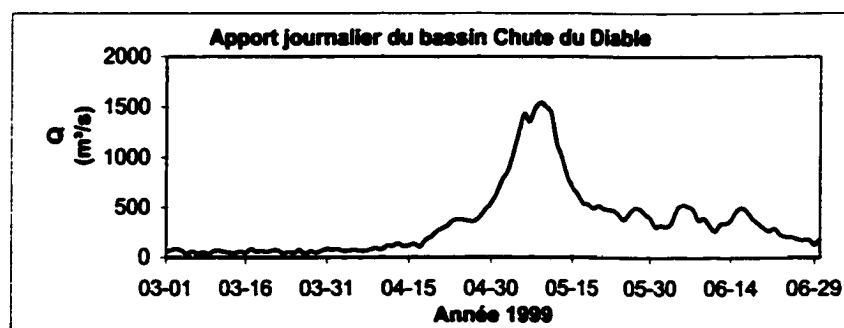


Figure 12 Apport journalier du bassin Chute du Diable

CHAPITRE 4

CARTES DE NEIGE MODÉLISÉES PAR SIMULATION NUMÉRIQUE

La validation du modèle de fonte de neige doit passer par un processus de simulation en temps réel. Ce chapitre regroupe les résultats des simulations effectuées avec le modèle sur le bassin versant à l'étude. La simulation a d'abord débuté sans image satellitaire ni valeur du facteur de fonte. Par la suite, à mesure qu'une image satellitaire était disponible, une nouvelle simulation était effectuée. Chacune des sections propose le même ordre de présentation, soit la carte de température et la carte du couvert de neige produite par le modèle au 27 avril 1999. Ensuite viennent les cartes de neige pour les jours débutant à la date de l'acquisition de l'image satellitaire de comparaison jusqu'à la fonte totale. Les résultats de ces simulations sont présentés dans les sections suivantes.

4.1 Simulation initiale

Pour la simulation initiale, un facteur de fonte de départ est posé arbitrairement à $K=8$.

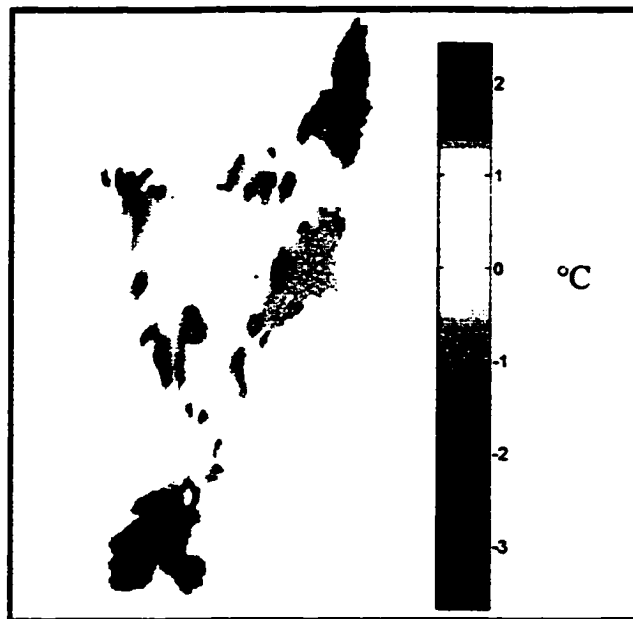


Figure 13 Carte des températures du 27 avril 1999

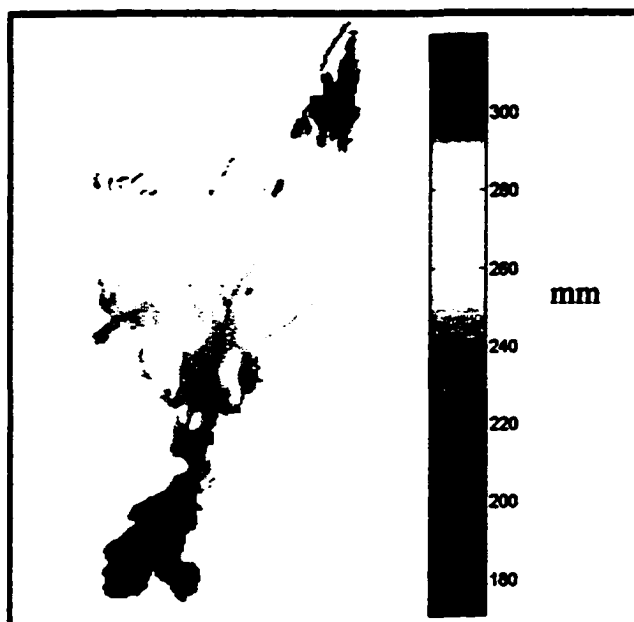


Figure 14 Carte du couvert de neige du 27 avril 1999

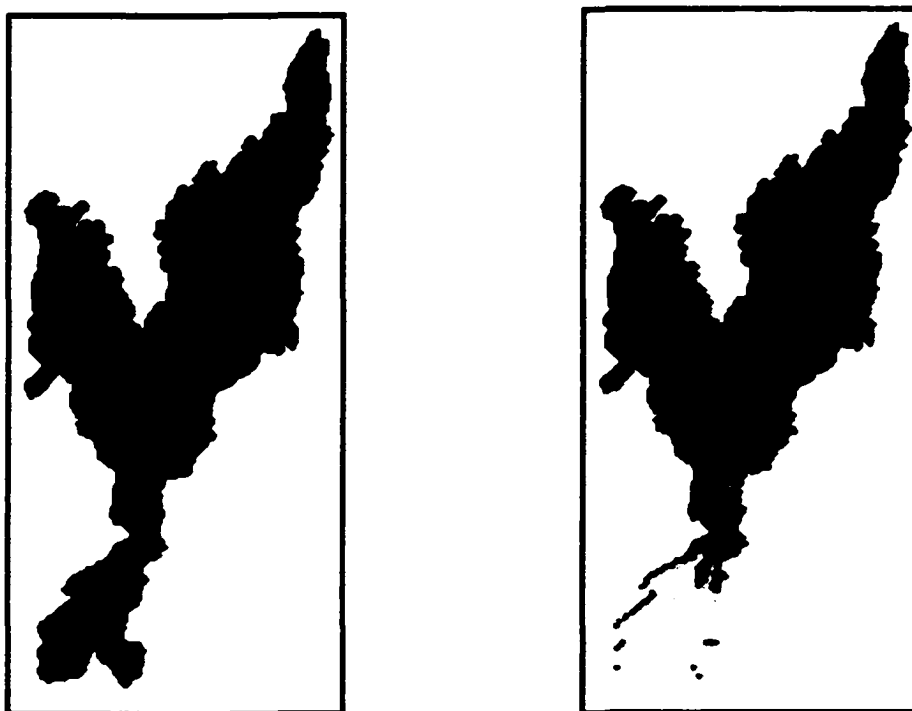


Figure 15 Carte de neige du 4 mai 1999 (à gauche) et du 5 mai 1999 (à droite)

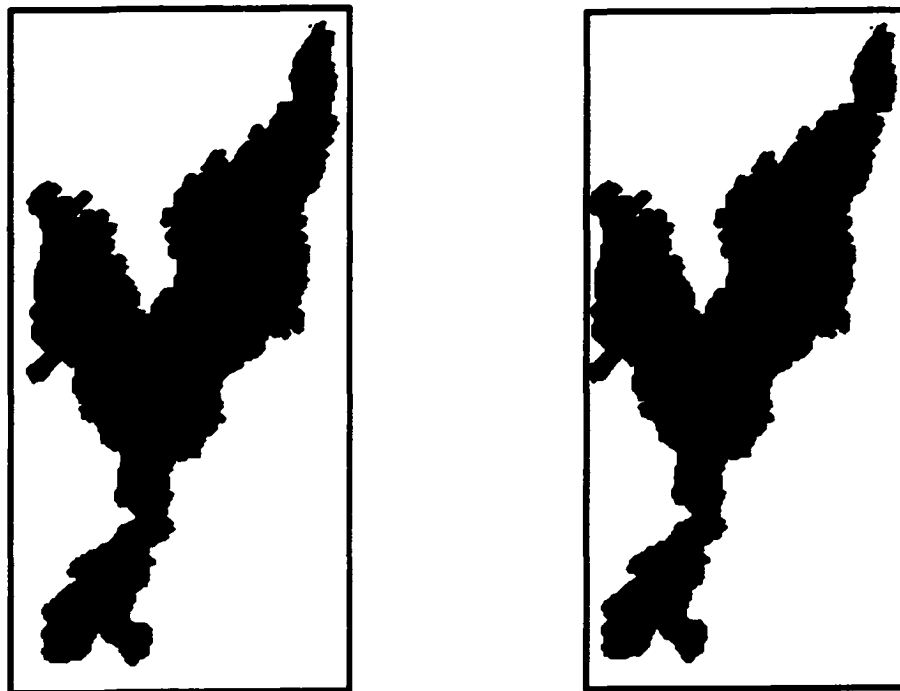


Figure 16 Carte de neige du 6 mai 1999 (à gauche) et du 7 mai 1999 (à droite)

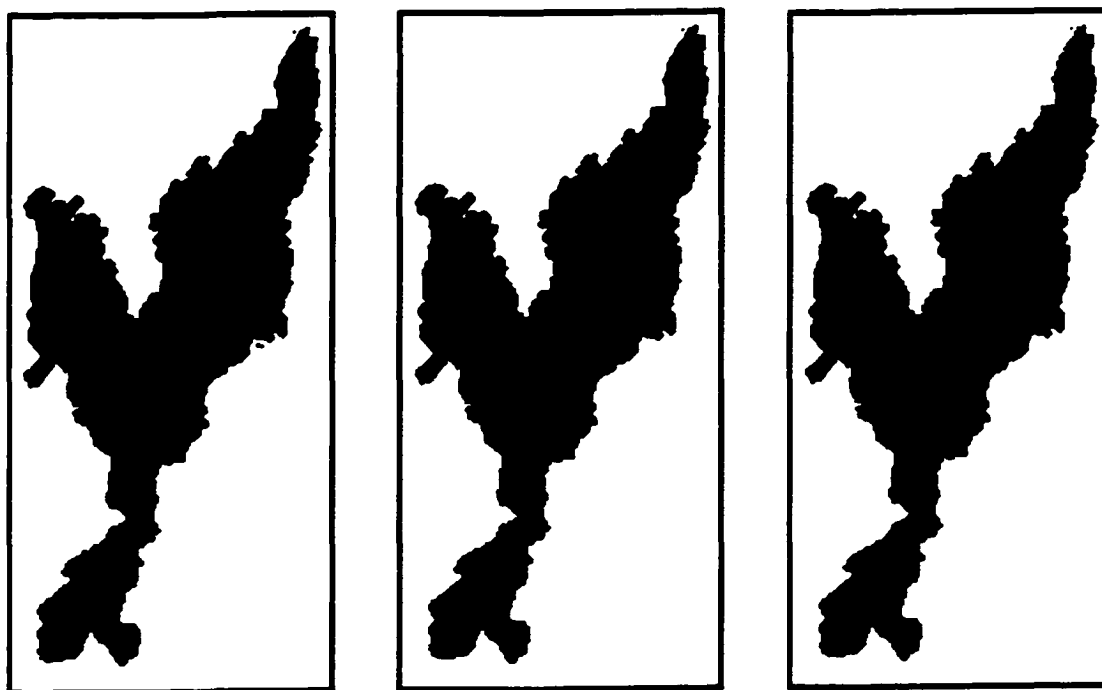


Figure 17 Carte de neige du 8 mai 1999 (à gauche), du 9 mai 1999 (au centre) et du 10 mai 1999 (à droite)

4.2 Simulation avec la première image satellitaire

Cartes produites après un premier ajustement du facteur K à l'aide d'une image NOAA-AVHRR acquise le 28 avril 1999 :

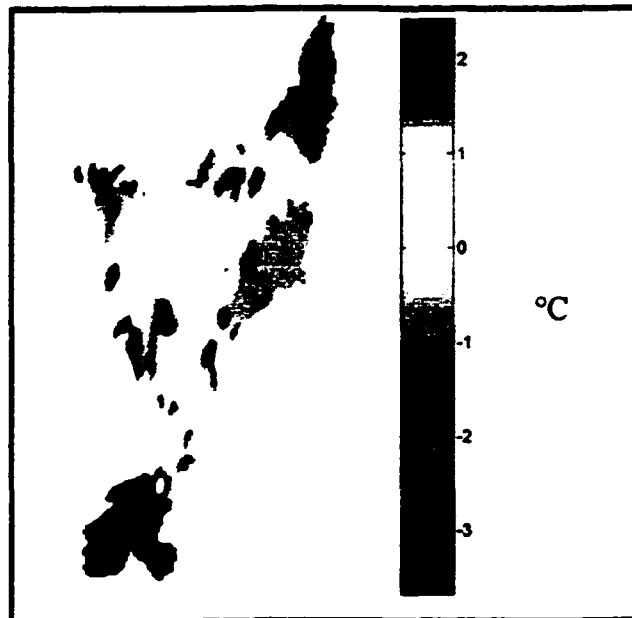


Figure 18 Carte des températures du 27 avril 1999

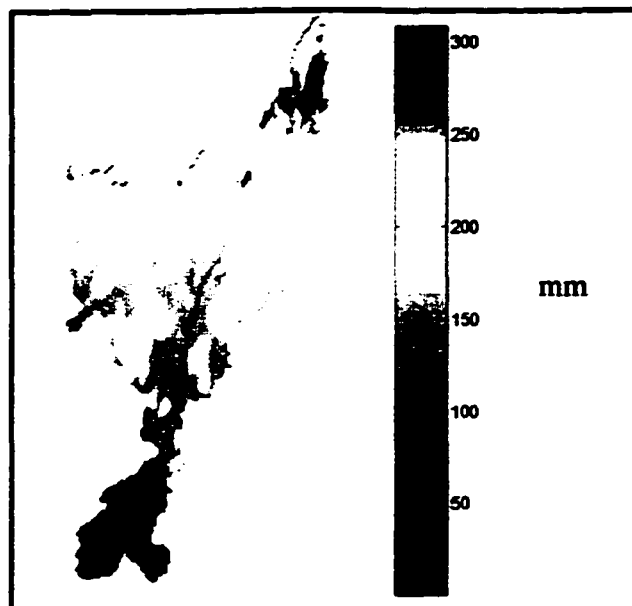


Figure 19 Carte du couvert de neige du 27 avril 1999

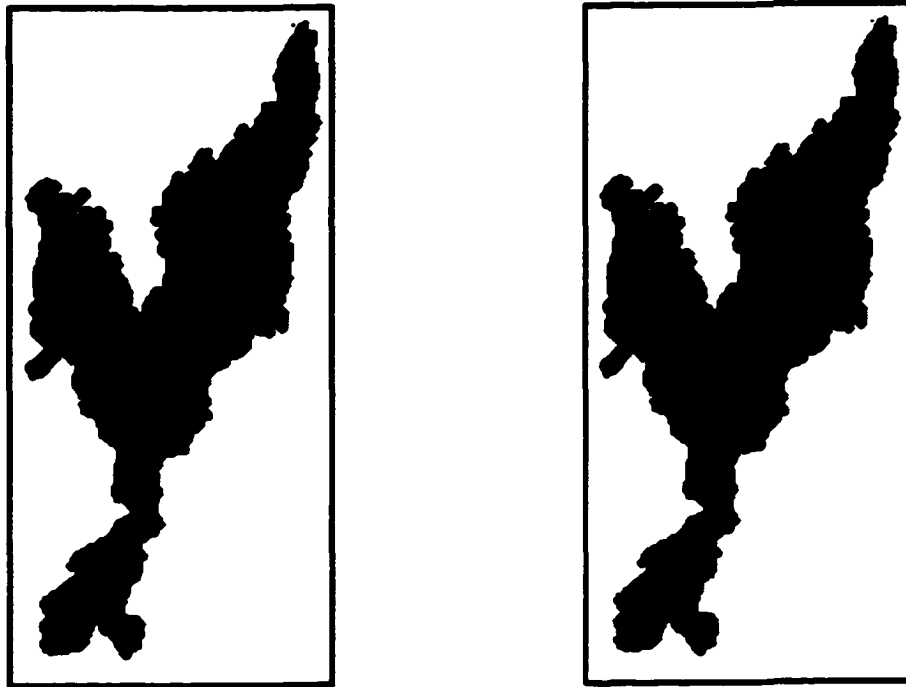


Figure 20 Carte de neige du 28 avril 1999 (à gauche) et du 29 avril 1999 (à droite)

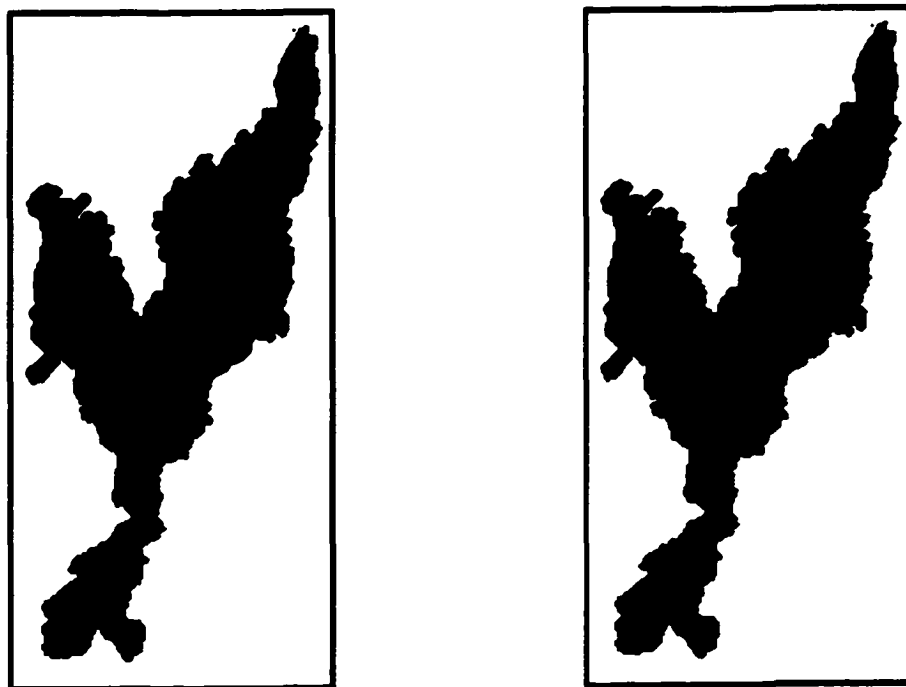


Figure 21 Carte de neige du 30 avril 1999 (à gauche) et du 1^{er} mai 1999 (à droite)

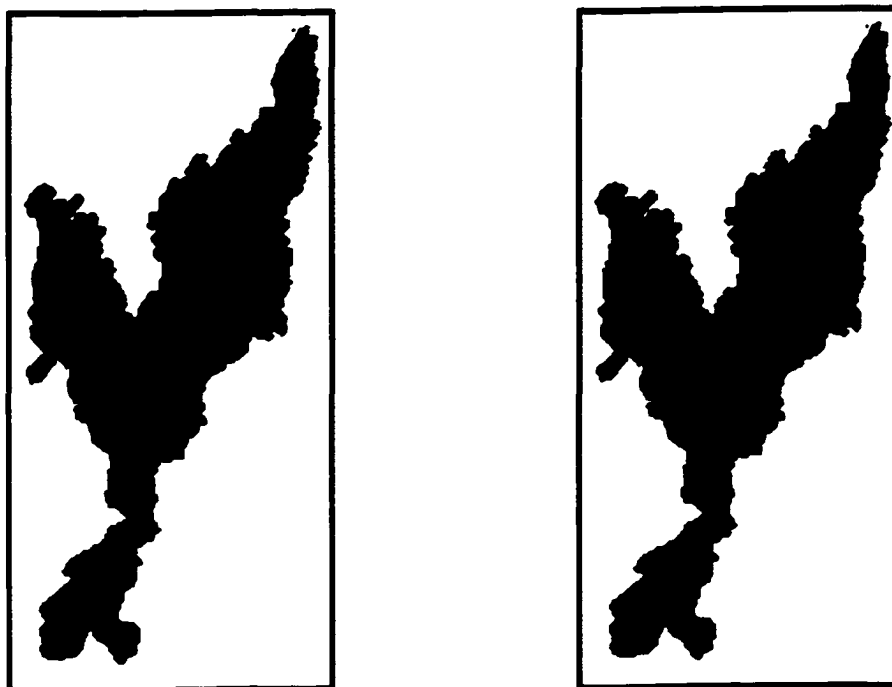


Figure 22 Carte de neige du 2 mai 1999 (à gauche) et du 3 mai 1999 (à droite)

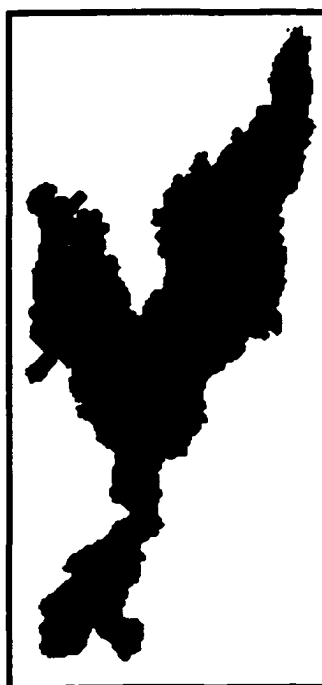


Figure 23 Carte de neige du 4 mai 1999

4.3 Simulation avec la deuxième image satellitaire

Cartes produites après un deuxième ajustement du facteur K à l'aide d'une image NOAA-AVHRR acquise le 30 avril 1999 :

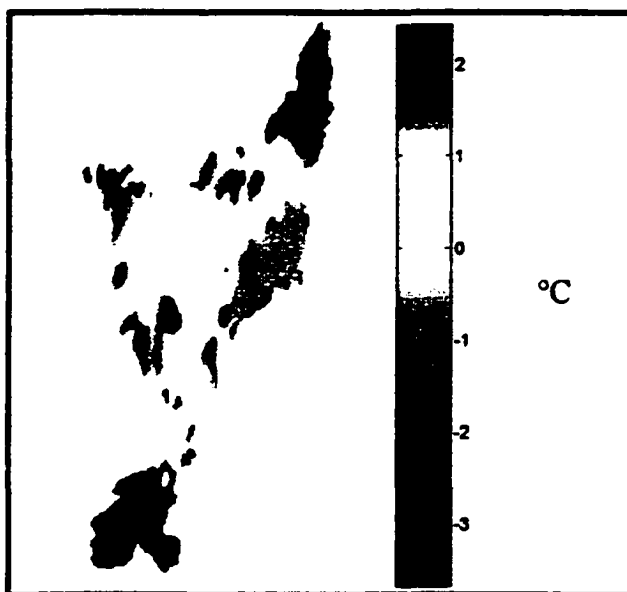


Figure 24 Carte des températures du 27 avril 1999

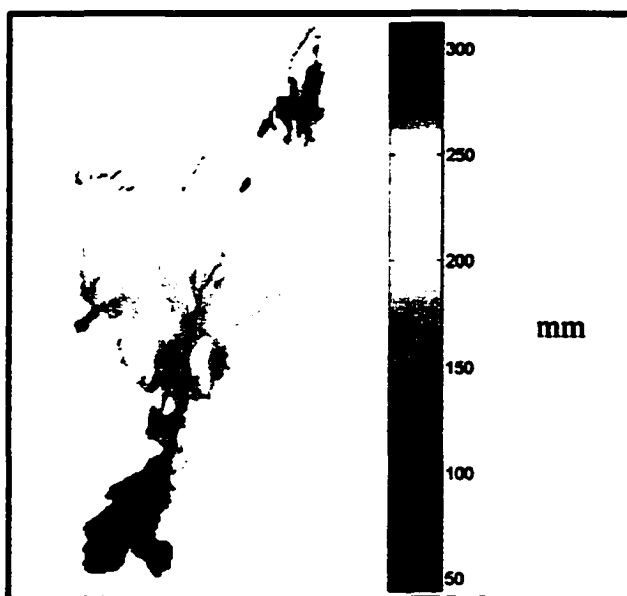


Figure 25 Carte du couvert de neige du 27 avril 1999

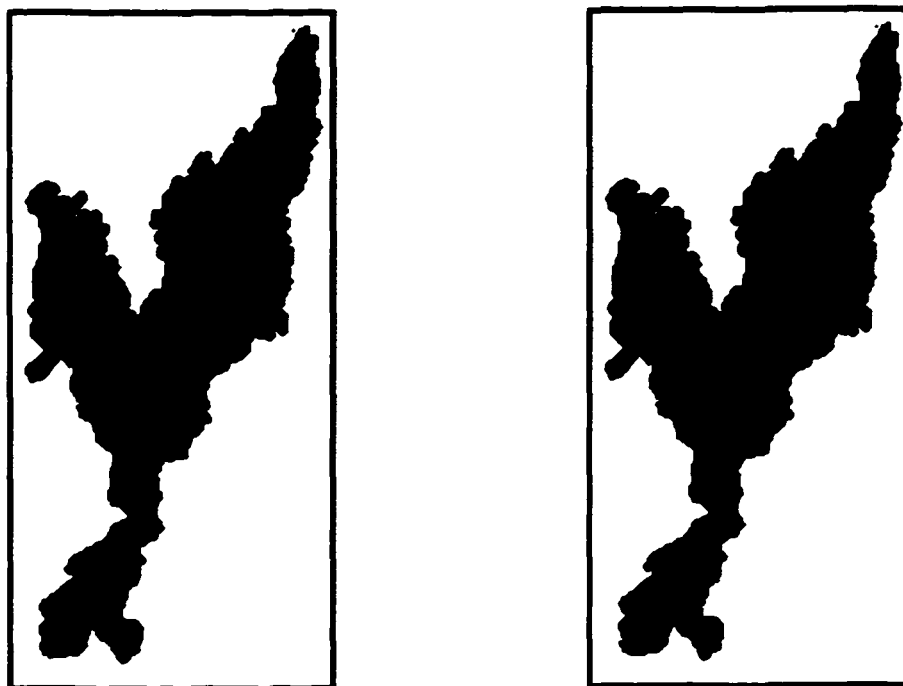


Figure 26 Carte de neige du 29 avril 1999 (à gauche) et du 30 avril 1999 (à droite)

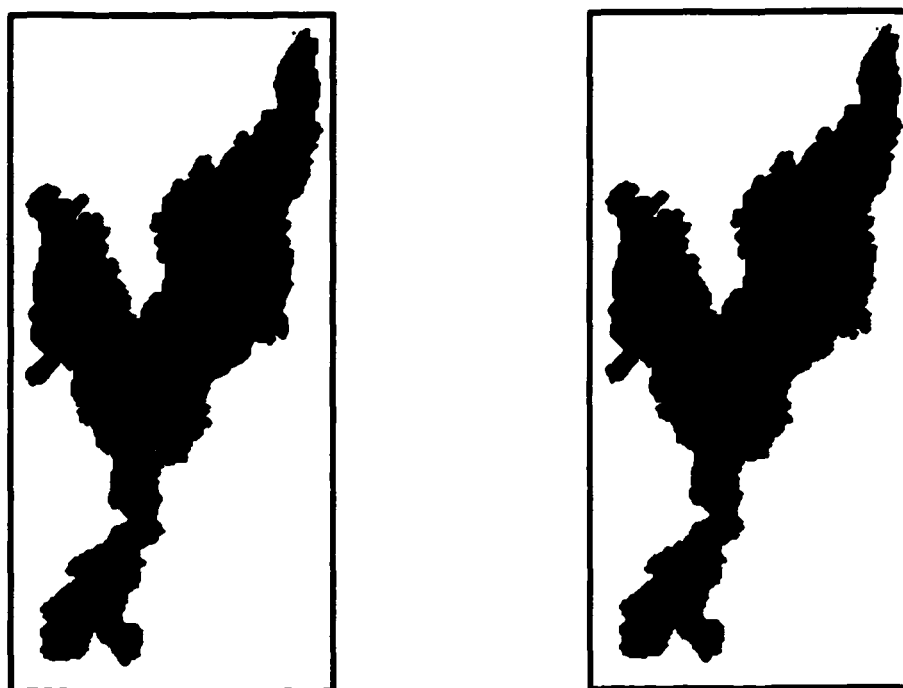


Figure 27 Carte de neige du 1^{er} mai 1999 (à gauche) et du 2 mai 1999 (à droite)

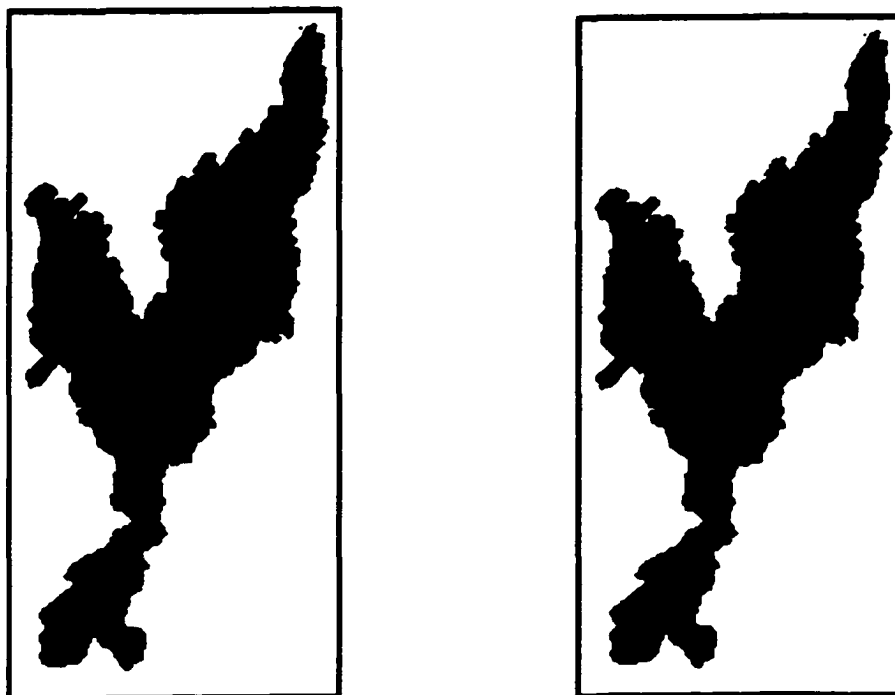


Figure 28 Carte de neige du 3 mai 1999 (à gauche) et du 4 mai 1999 (à droite)



Figure 29 Carte de neige du 5 mai 1999

4.4 Simulation avec la troisième image satellitaire

Cartes produites après un deuxième ajustement du facteur K à l'aide d'une image NOAA-AVHRR acquise le 30 avril 1999 :

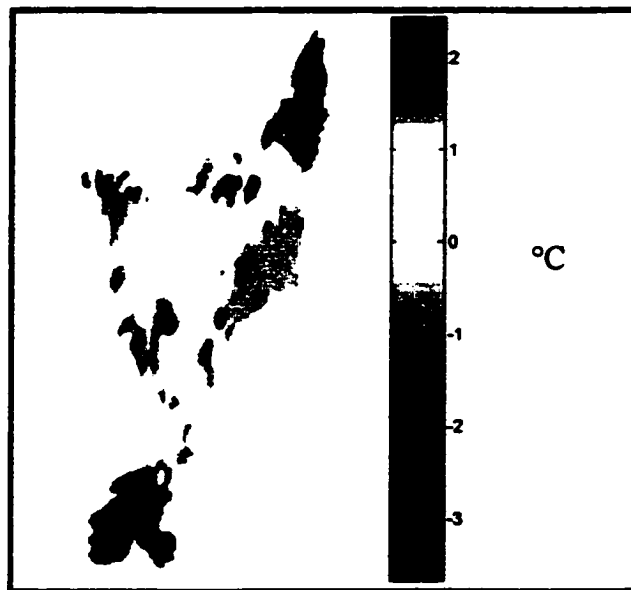


Figure 30 Carte des températures du 27 avril 1999

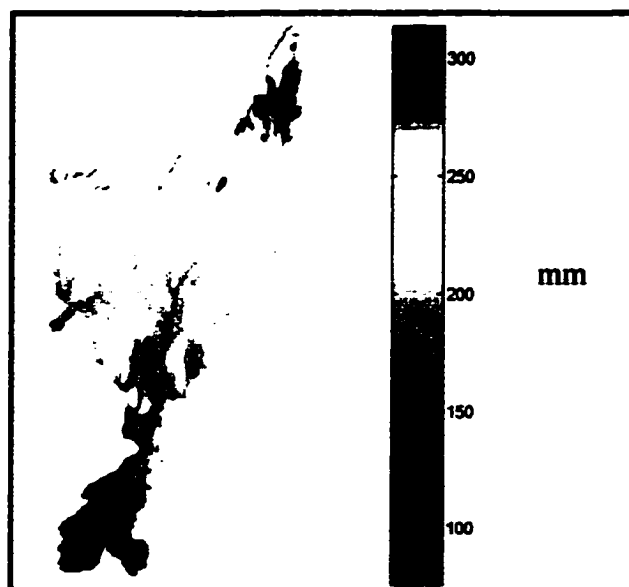


Figure 31 Carte du couvert de neige du 27 avril 1999

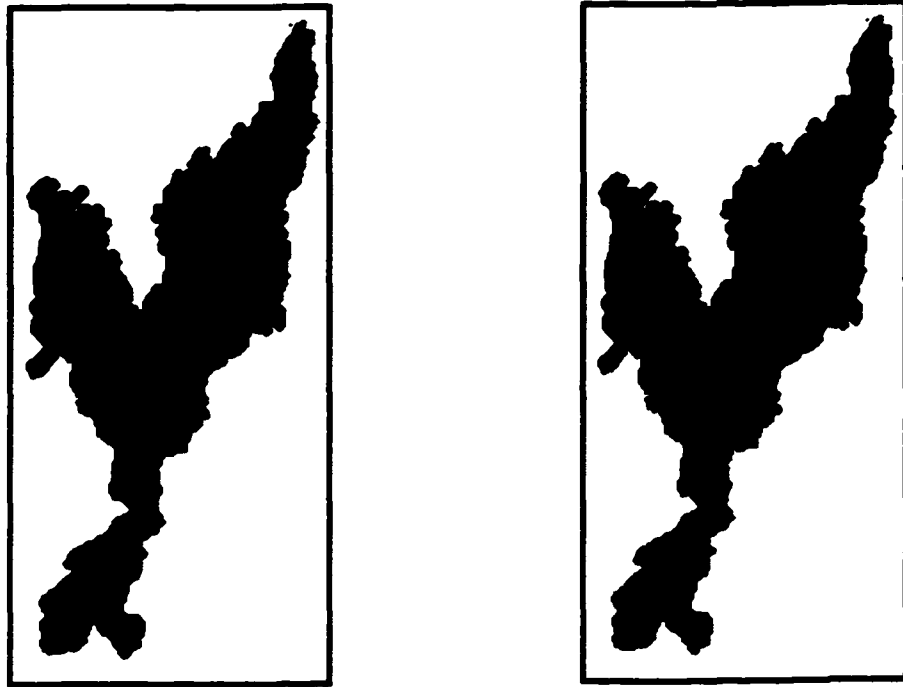


Figure 32 Carte de neige du 30 avril 1999 (à gauche) et du 1^{er} mai 1999 (à droite)

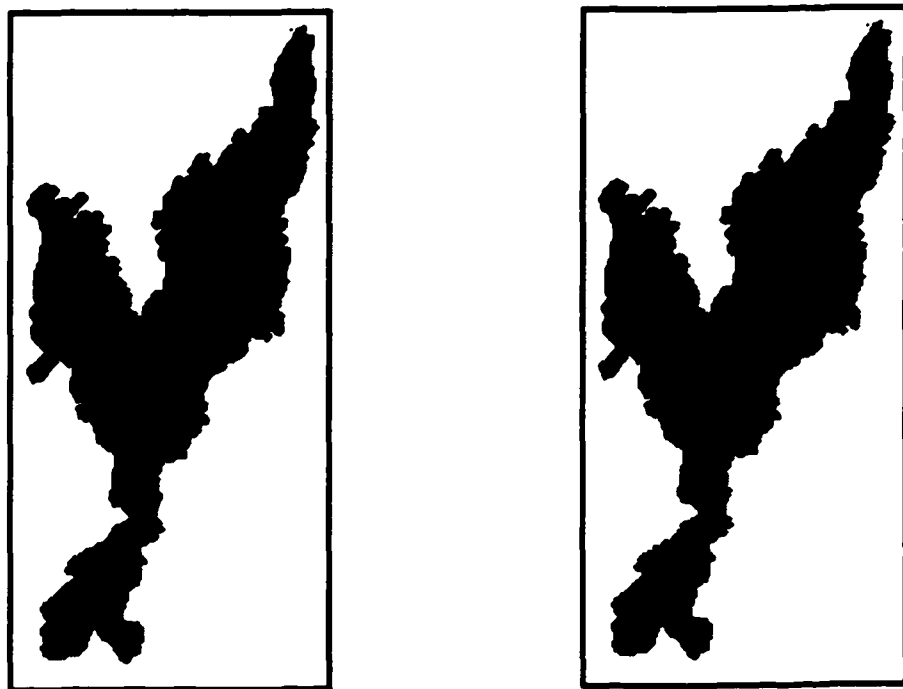


Figure 33 Carte de neige du 2 mai 1999 (à gauche) et du 3 mai 1999 (à droite)

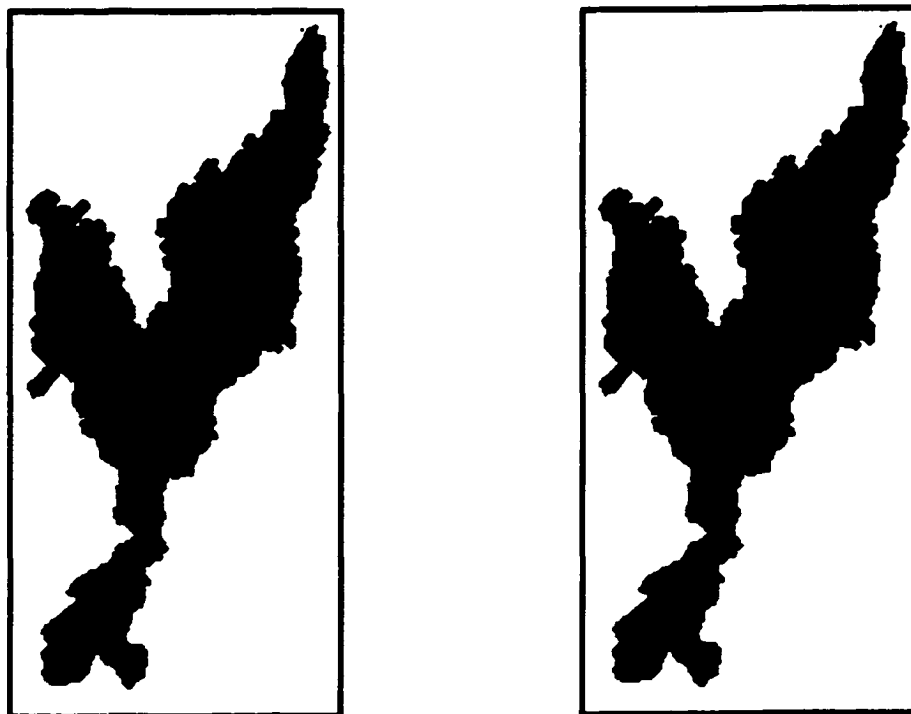


Figure 34 Carte de neige du 4 mai 1999 (à gauche) et du 5 mai 1999 (à droite)

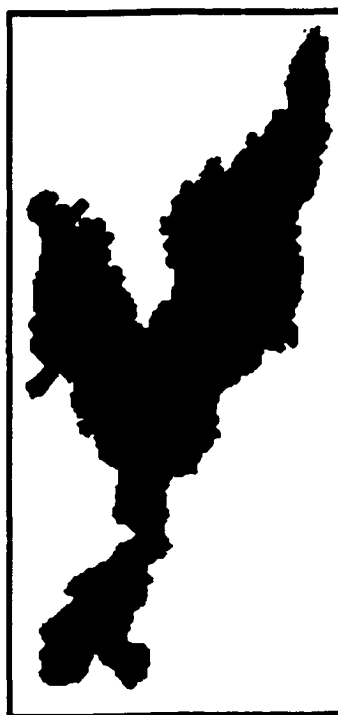


Figure 35 Carte de neige du 6 mai 1999

4.5 Simulation avec la quatrième image satellitaire

Cartes produites après un quatrième ajustement du facteur K à l'aide d'une image NOAA-AVHRR acquise le 2 mai 1999 :

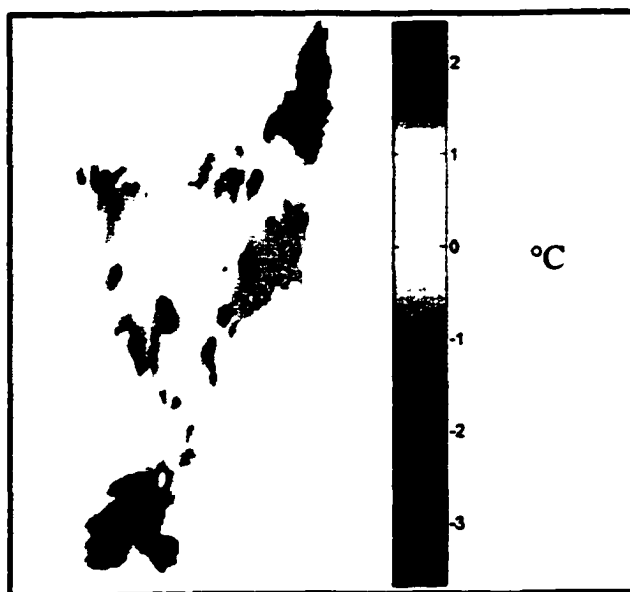


Figure 36 Carte des températures du 27 avril 1999

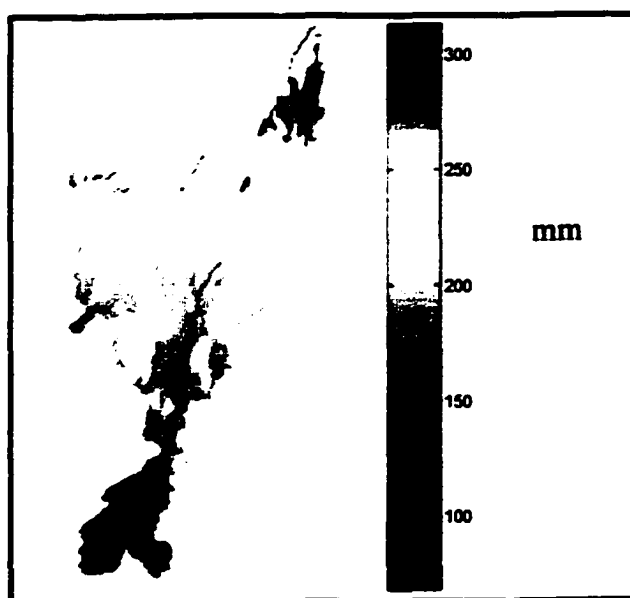


Figure 37 Carte du couvert de neige du 27 avril 99

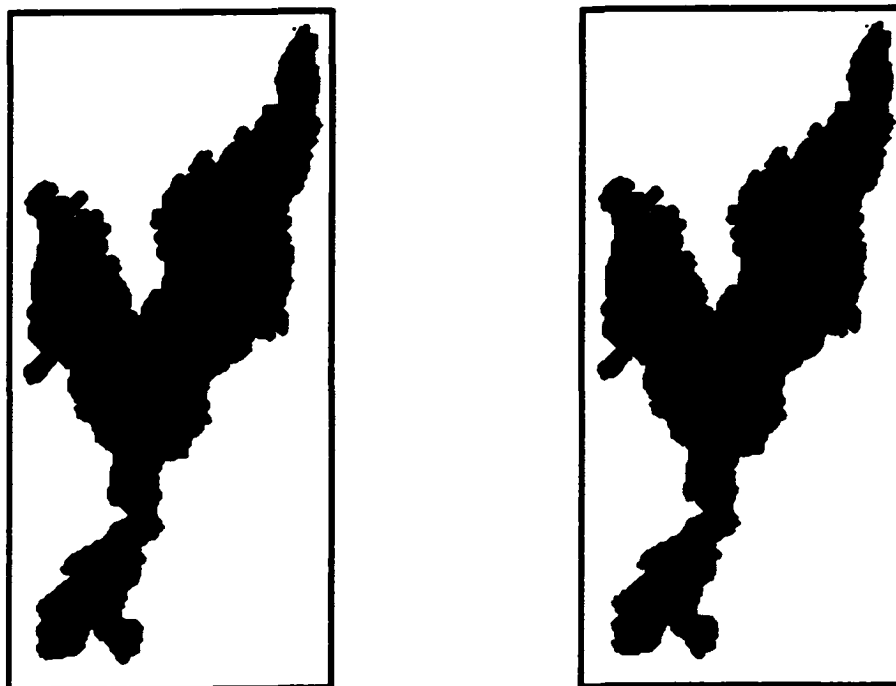


Figure 38 Carte de neige du 30 avril 1999 (à gauche) et du 1^{er} mai 1999 (à droite)

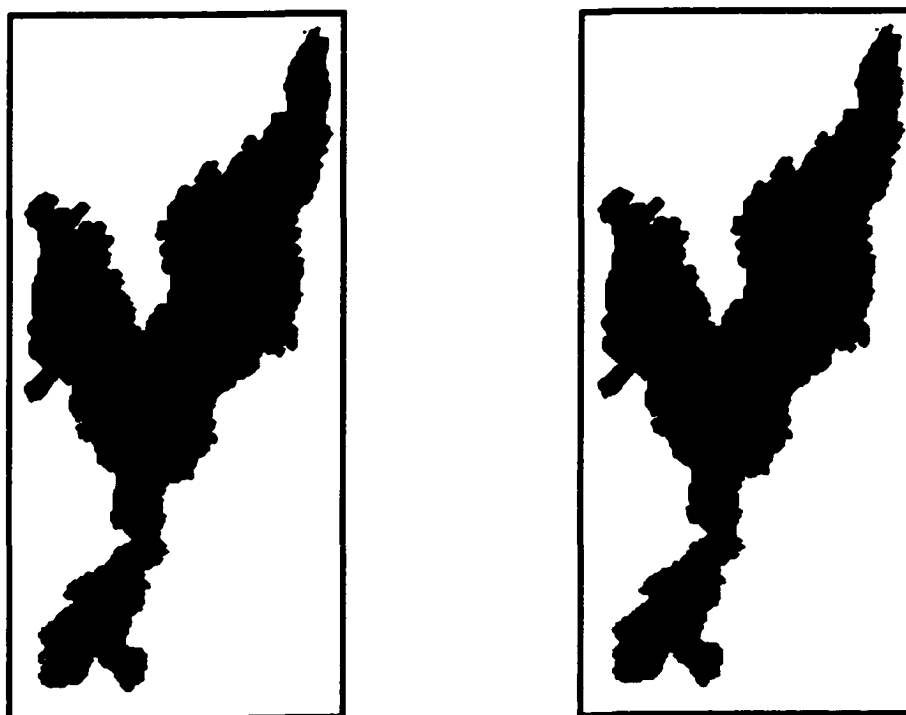


Figure 39 Carte de neige du 2 mai 1999 (à gauche) et du 3 mai 1999 (à droite)

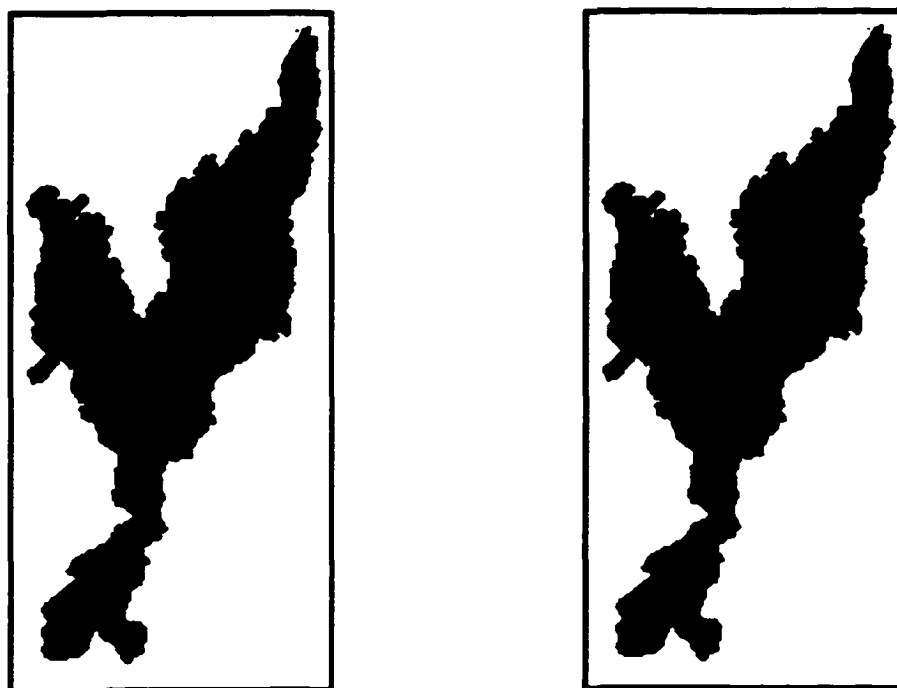


Figure 40 Carte de neige du 4 mai 1999 (à gauche) et du 5 mai 1999 (à droite)

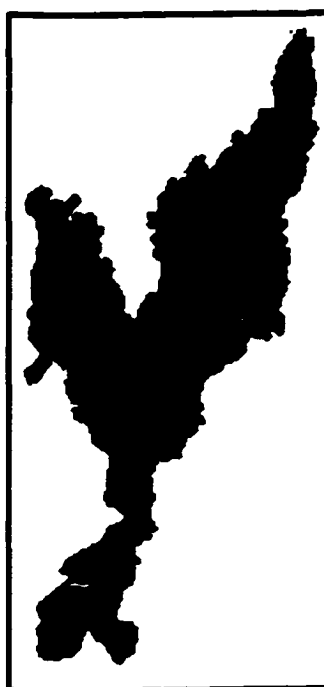


Figure 41 Carte de neige du 6 mai 1999

CONCLUSION

Le projet dont fait l'objet ce mémoire porte sur la conception d'un nouvel outil pour améliorer les prévisions hydrologiques lors des périodes de fonte printanière. En effet, cet outil a pour objectif de combler le manque de connaissances des propriétés des bassins versants étudiés à l'aide de la télédétection. Il est conçu dans une optique d'aide à la décision pour les gestionnaires de bassins versants tout en maintenant une simplicité d'utilisation pour un contexte opérationnel. La compagnie Alcan collabore au projet en rendant disponible les données qu'elle utilise pour la gestion de ses bassins versants.

Basé sur une approche degrés-jour, un modèle numérique de fonte de neige est conçu dans le but d'utiliser la télédétection. De plus, le modèle est créé de sorte qu'il utilise les mêmes données que celles déjà disponibles chez Alcan. Les données de télédétection utilisées proviennent d'images acquises avec le capteur AVHRR du satellite NOAA-14. Les données de télédétection doivent d'abord être traitées afin d'extraire l'information relative au couvert de neige au sol, présentée sous forme de carte de neige. L'intégration de ces informations s'effectue suivant un algorithme particulier créé dans le but de permettre un ajustement en temps réel du paramètre de fonte et de la quantité de neige au sol. L'ajustement s'effectue dans l'ordre, pour la superficie de recouvrement de la neige, pour la distribution géographique de la neige et pour la quantité de neige réellement présente sur le bassin à l'aide des données de débits.

L'étude a ensuite porté sur l'application de la méthode à la gestion d'un bassin versant de la compagnie Alcan. Il s'agit d'un sous-bassin du bassin versant du Lac St-Jean, celui de la Chute du Diable pour la saison de fonte 1999. La gestion actuelle de ce bassin s'effectue à l'aide d'image NOAA-AVHRR mais la démarche décisionnelle repose sur un jugement humain basé sur des corrélations avec la ligne de neige sur le bassin. Cette façon de faire ne permet pas une analyse fiable de l'information et de son

intégration dans un modèle numérique de fonte. De plus, elle se limite à des actions instantanées puisqu'il est impossible d'effectuer des prévisions.

Il est important de noter que pour l'étude de cas, la date du début des simulations est à la fin du mois de mars, soit un mois avant la période de fonte intense. Ceci a pour but de permettre une meilleure représentation du couvert de neige sur le territoire qui est plus uniforme à cette période. De plus, en l'absence de données concernant le couvert végétal, l'index de végétation est supposé uniforme sur tout le bassin.

Les résultats obtenus par simulation du modèle sur ce bassin indiquent que l'approche atteint un bon niveau d'efficacité. Ce niveau est directement influencé par le nombre d'image NOAA-AVHRR utilisé en cours de simulation. Ainsi, dès qu'une image est jumelée au modèle, l'erreur de la prévision est réduite à environ deux jours et diminue à moins d'une journée lorsqu'une deuxième image est acquise le surlendemain.

En somme, l'approche proposée par ce projet semble très prometteuse puisqu'elle permet d'offrir un outil de prévisions hydrologiques avec un bon niveau d'efficacité. De plus, son côté opérationnel le situe bien dans un contexte industriel en utilisant l'information déjà disponible en plus d'intégrer la télédétection, la voie de l'avenir. La simplicité du modèle de fonte fait en sorte qu'il demeure suffisamment accessible au gestionnaire en plus d'être numériquement stable. Il permet aussi de bien mettre en évidence l'apport considérable de la télédétection dans le processus de prévision.

Cependant, plusieurs aspects essentiels n'ont pas été abordés et feront l'objet de travaux futurs à court et moyen terme. Dans un premier temps, l'approche devra être validée en utilisant d'autres saisons de fonte du bassin de la Chute du Diable en suivant la même méthodologie de simulation. Pour ce faire, la compagnie Alcan fournira les données typiques nécessaires pour l'étude des autres saisons de fonte. De même, une transposition de la méthode à d'autres bassins versants septentrionaux de dimensions

similaires, plus grandes et plus petites sera réalisée. Ainsi, le modèle et l'algorithme seront soumis à différents contextes permettant d'évaluer l'efficacité réelle de l'approche et par le fait même de mieux connaître ces capacités d'adaptation. Cette étape s'effectuera pour la première partie de l'algorithme, c'est-à-dire la partie comparant les surfaces enneigées entre celle observées et celle produites par simulation.

L'élaboration des deux parties restantes de l'algorithme sera réalisée, soit la deuxième et troisième séquence d'ajustement de la Figure 2. La deuxième consiste en l'analyse des cartes de neige simulées et celles observées afin d'établir des corrections au sujet de l'emplacement géographique de la neige sur le bassin versant. La procédure pour effectuer ce processus prendra en considération la répartition de la neige en fonction de l'altitude et de la latitude à l'intérieur du bassin. En ce qui concerne la troisième séquence, elle réfère à l'analyse des débits arrivant à l'exutoire de bassin versant. Elle a pour but de déterminer les quantités de neige réellement fondues sur le bassin et ainsi déterminer par un processus itératif la quantité de neige restante. Les deux nouvelles parties de l'algorithme devront faire l'objet d'essais du même type que ceux pratiqués sur la première phase dans le but d'en effectuer une évaluation complète.

Les travaux ultérieurs comprendront le développement d'un module d'optimisation de l'algorithme. En effet, ce module permettra au modèle d'effectuer lui-même les corrections de paramètre qui s'imposent dans le but d'obtenir la meilleure corrélation possible entre ce qui est observé et simulé pour chacune des boucles d'ajustement. Dans ce sens, le modèle de fonte présentement conçu sera jumelé à un modèle d'écoulement hydrologique. Ceci permettra une meilleure analyse des cartes de neige modélisées évitant la corrélation visuelle dans la détermination du débit de pointe. L'apport de ces deux concepts à l'intérieur du modèle permettra de diminuer au minimum le risque d'erreur provenant du jugement de l'utilisateur.

L'intégration au modèle des données de végétation fera également l'objet de travaux futurs. Le but sera d'utiliser les données de télédétection disponibles, soit celles provenant des images NOAA-AVHRR. Pour ce faire, une analyse des images satellitaires basée sur l'extraction des valeurs de la biomasse sera effectuée pour ensuite établir un index de végétation. Les données devront également être dans un format compatible avec le modèle.

Au niveau du support même du modèle, une quantité importante de travail demeure. Tout d'abord, la création d'une interface usager conviviale devra être réalisée afin de permettre une communication efficace avec l'utilisateur. Ensuite, une révision du code de programmation dans le but de le rendre plus efficace en effectuant une optimisation des commandes utilisées. Aussi, réorganiser et développer la structure d'intégration des données à l'intérieur du modèle pour éventuellement accéder directement à des bases de données regroupant les informations nécessaires.

À plus long terme, il serait intéressant d'explorer les possibilités qu'offre l'approche conçue dans ce projet afin d'estimer automatiquement l'épaisseur initiale du couvert de neige. La méthode préconisée serait l'établissement d'un couvert de neige d'une épaisseur aléatoire que le modèle ajuste dès les premières images satellitaires. Il serait également essentiel d'effectuer une analyse d'ordre économique pour établir le gain monétaire que cette approche permet d'atteindre. La façon de faire serait d'effectuer des simulations de gestion en temps réel suivant les conditions hydrologiques de l'année choisie et ensuite d'établir la comparaison monétaire entre la méthode traditionnelle et celle employée ici.

ANNEXE 1

Images AVHRR du satellite NOAA-14

Image de télédétection AVHRR**28 avril 1999**

Image de télédétection AVHRR**29 avril 1999**

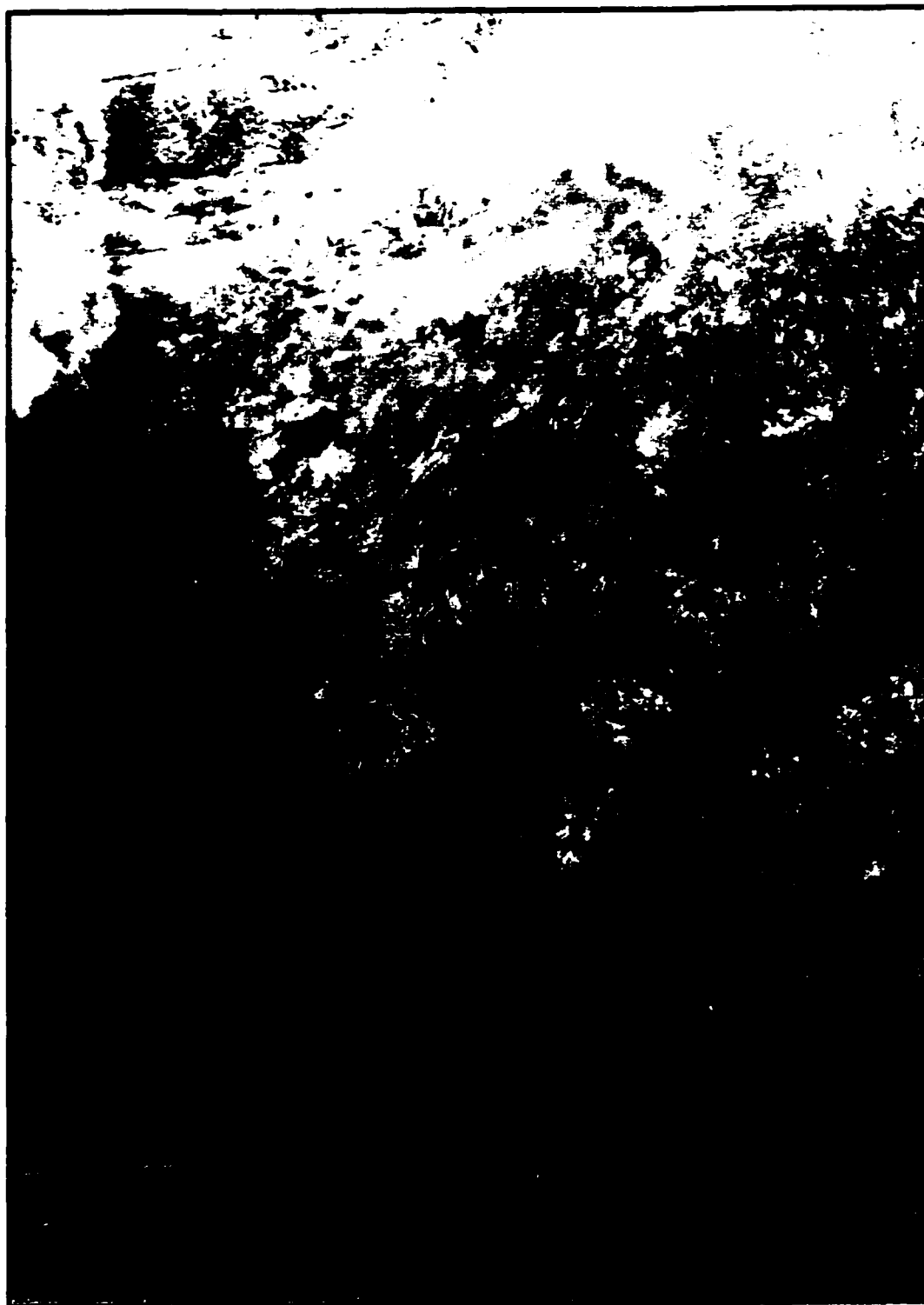
Image de télédétection AVHRR**30 avril 1999**

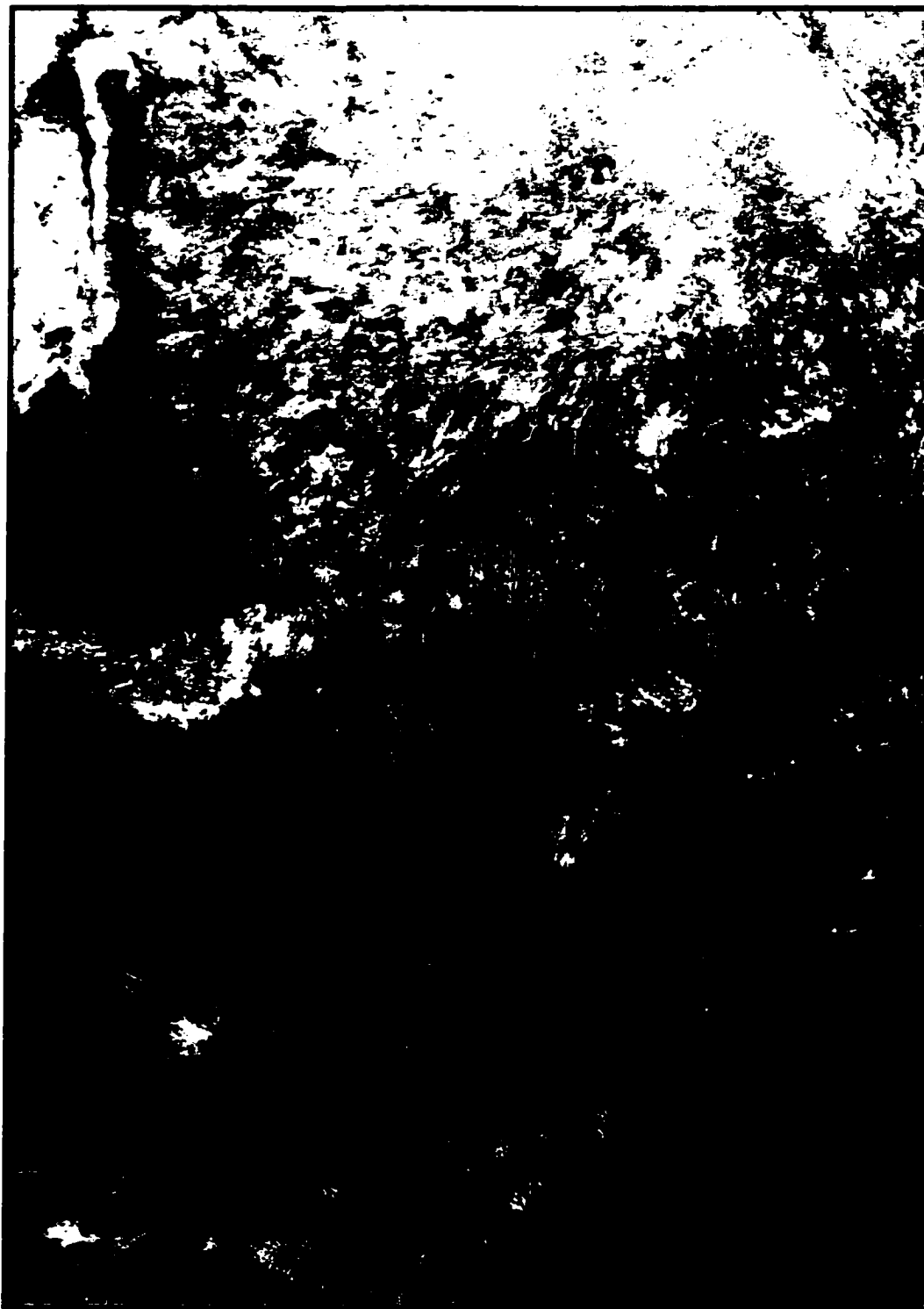
Image de télédétection AVHRR**1^{er} mai 1999**

Image de télédétection AVHRR

2 mai 1999

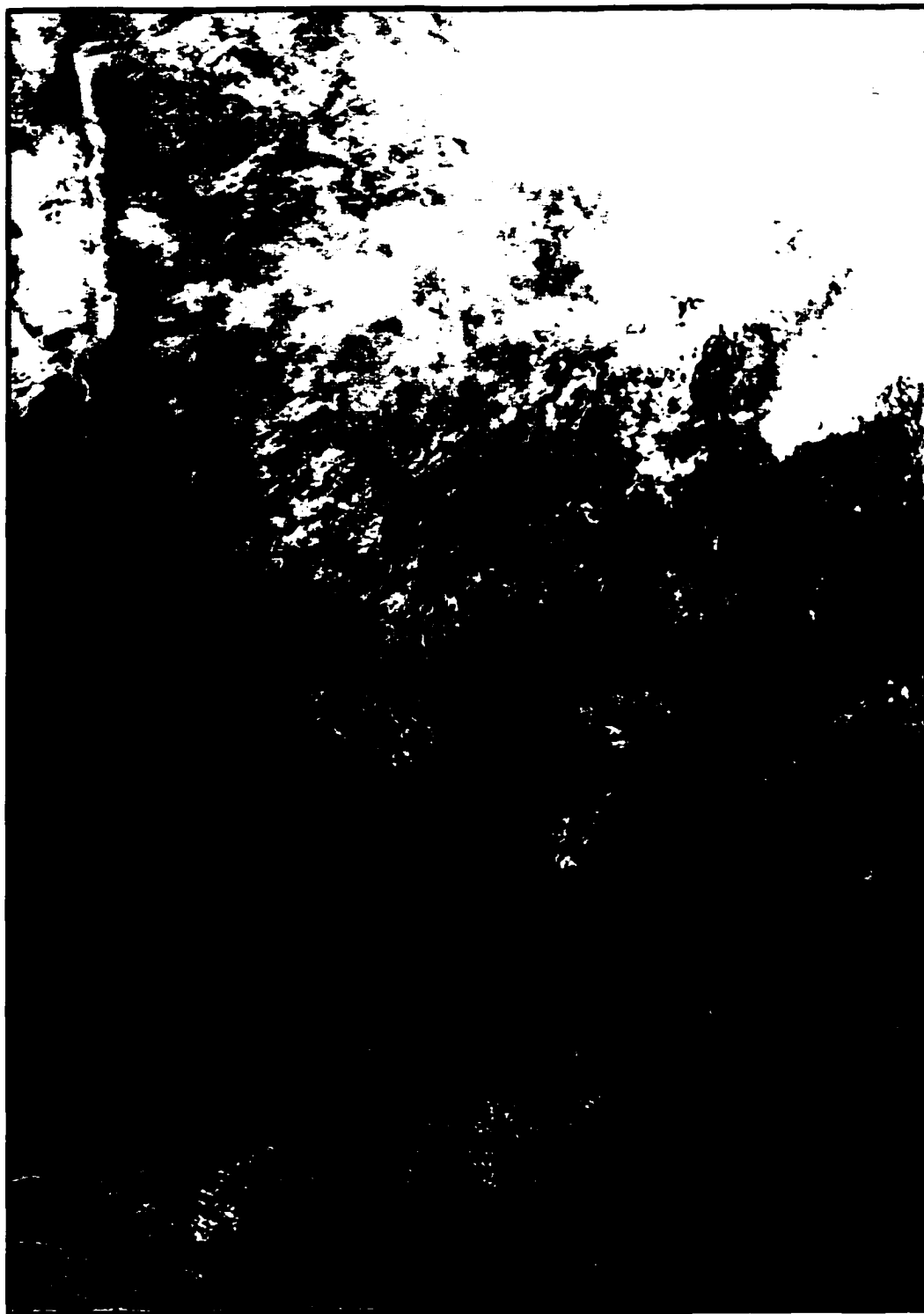


Image de télédétection AVHRR**3 mai 1999**

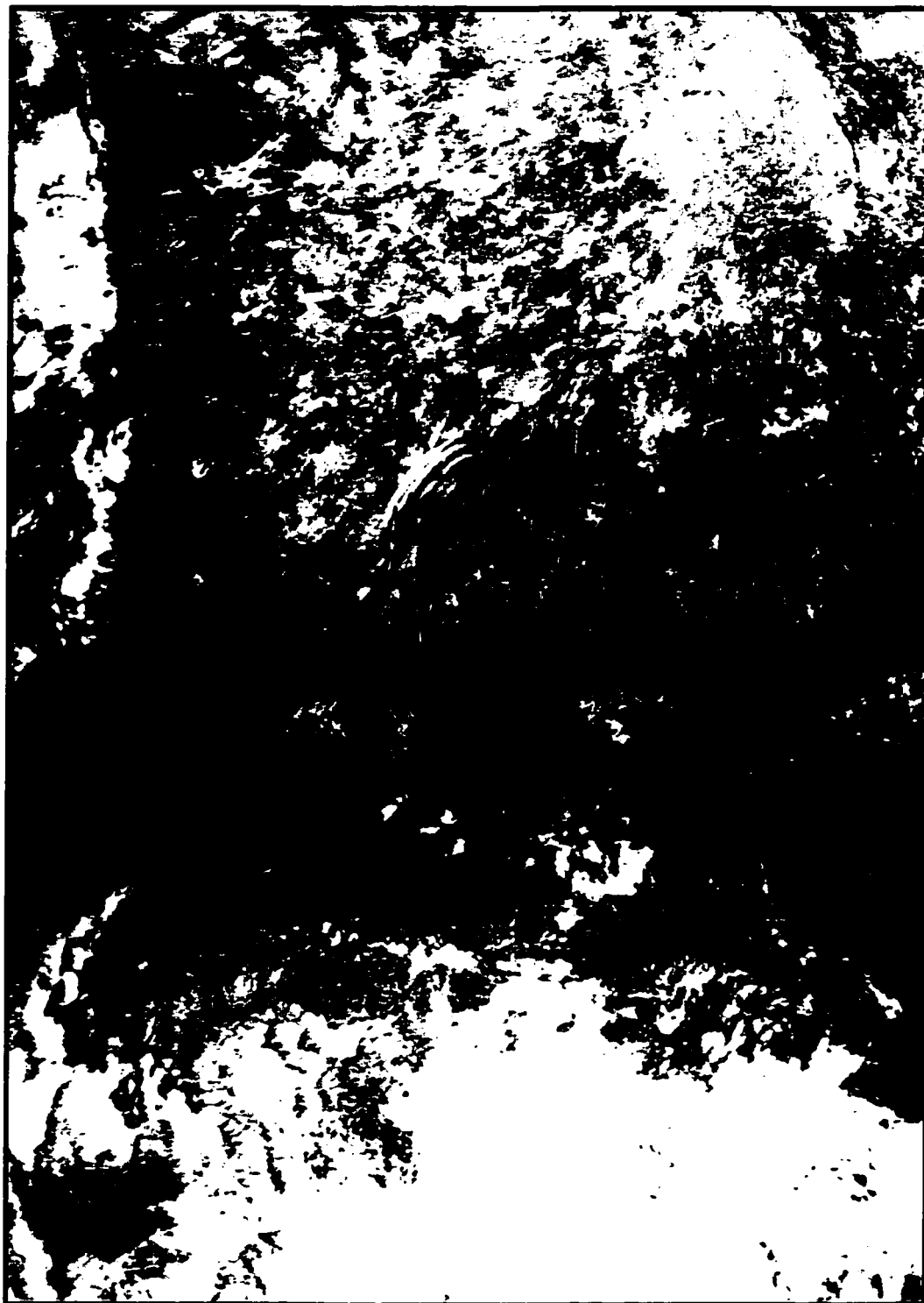
Image de télédétection AVHRR**4 mai 1999**

Image de télédétection AVHRR**5 mai 1999**

Image de télédétection AVHRR**6 mai 1999**

Image de télédétection AVHRR**7 mai 1999**

Image de télédétection AVHRR**8 mai 1999**

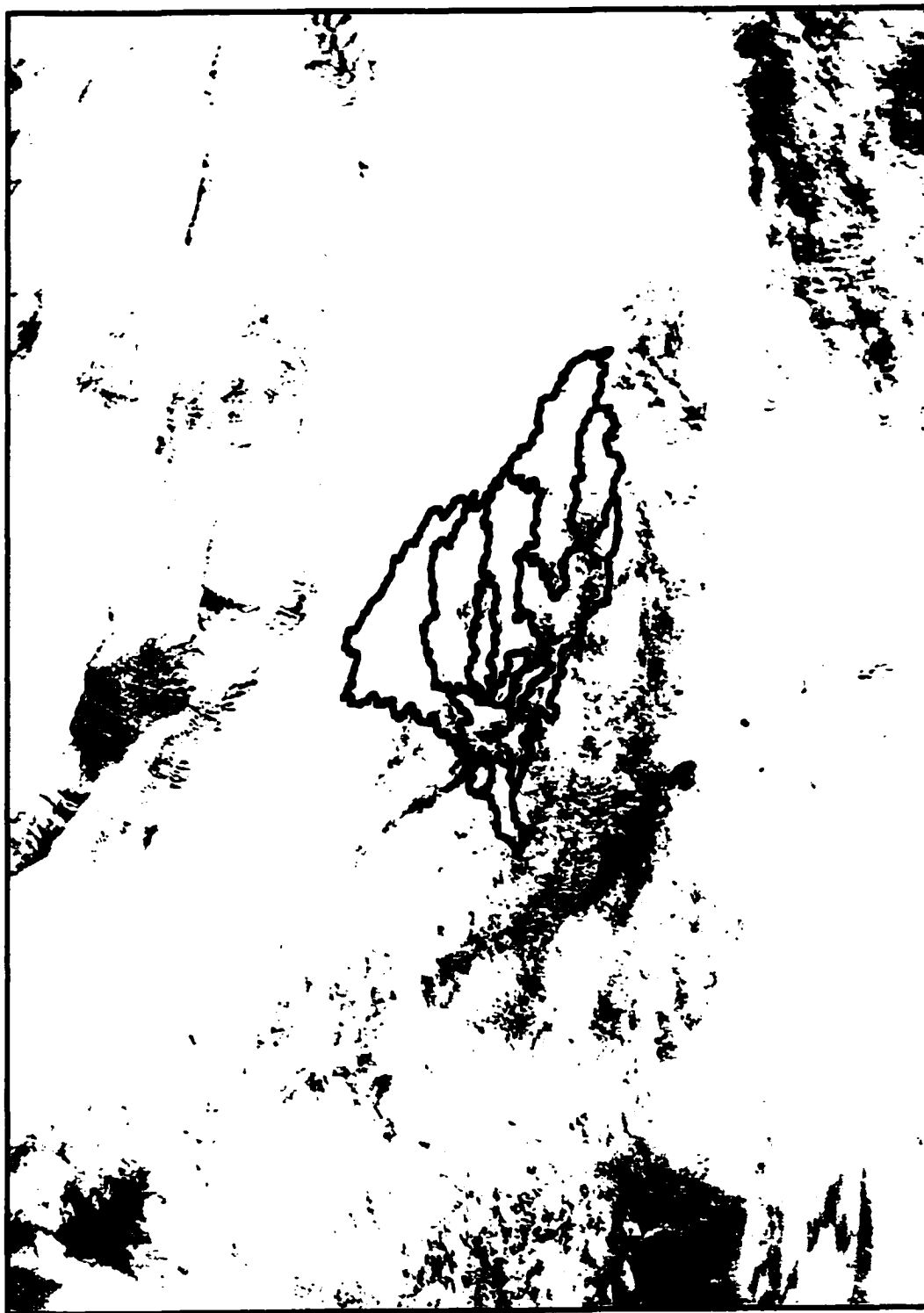
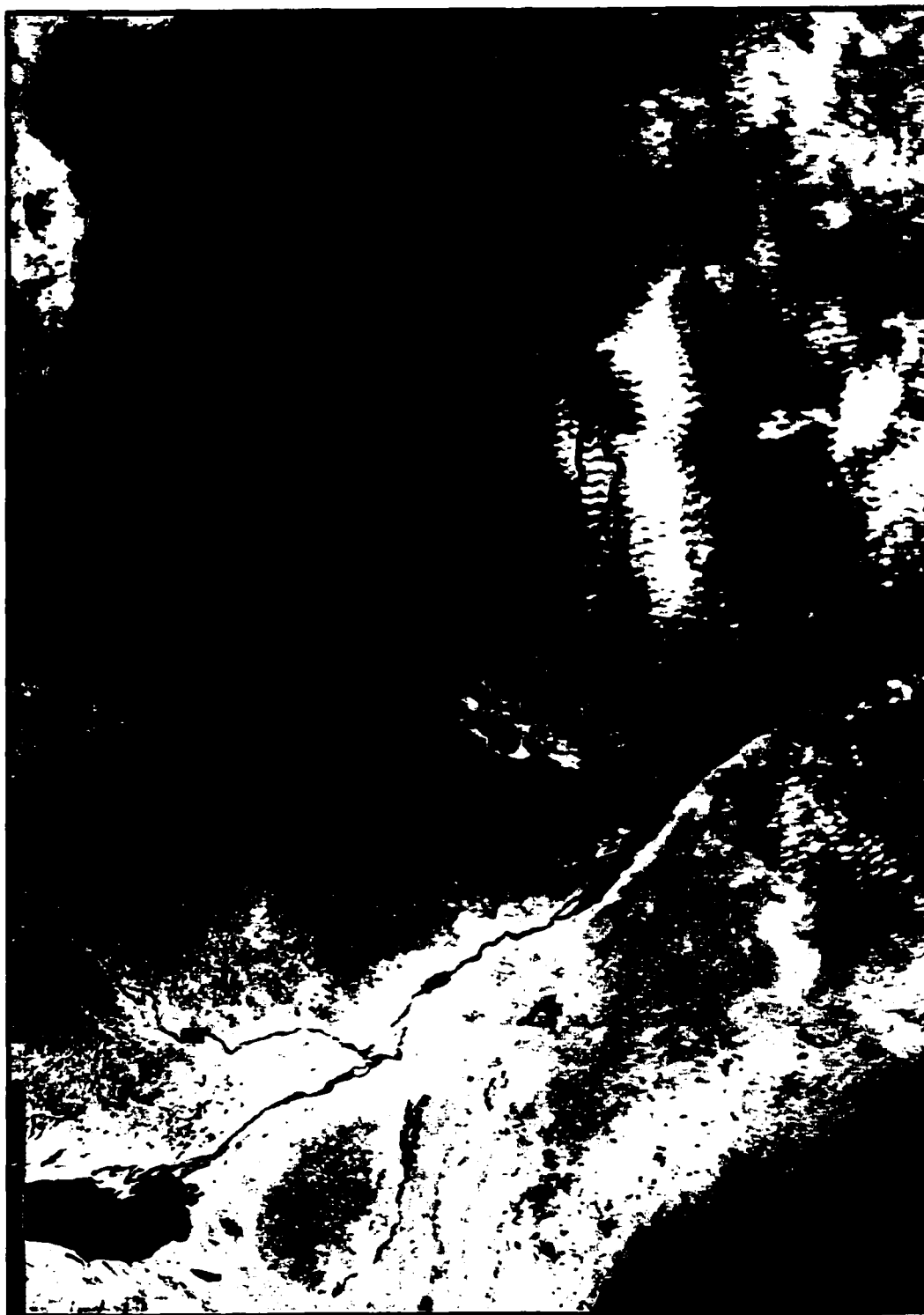
Image de télédétection AVHRR**9 mai 1999**

Image de télédétection AVHRR**11 mai 1999**

Image de télédétection AVHRR

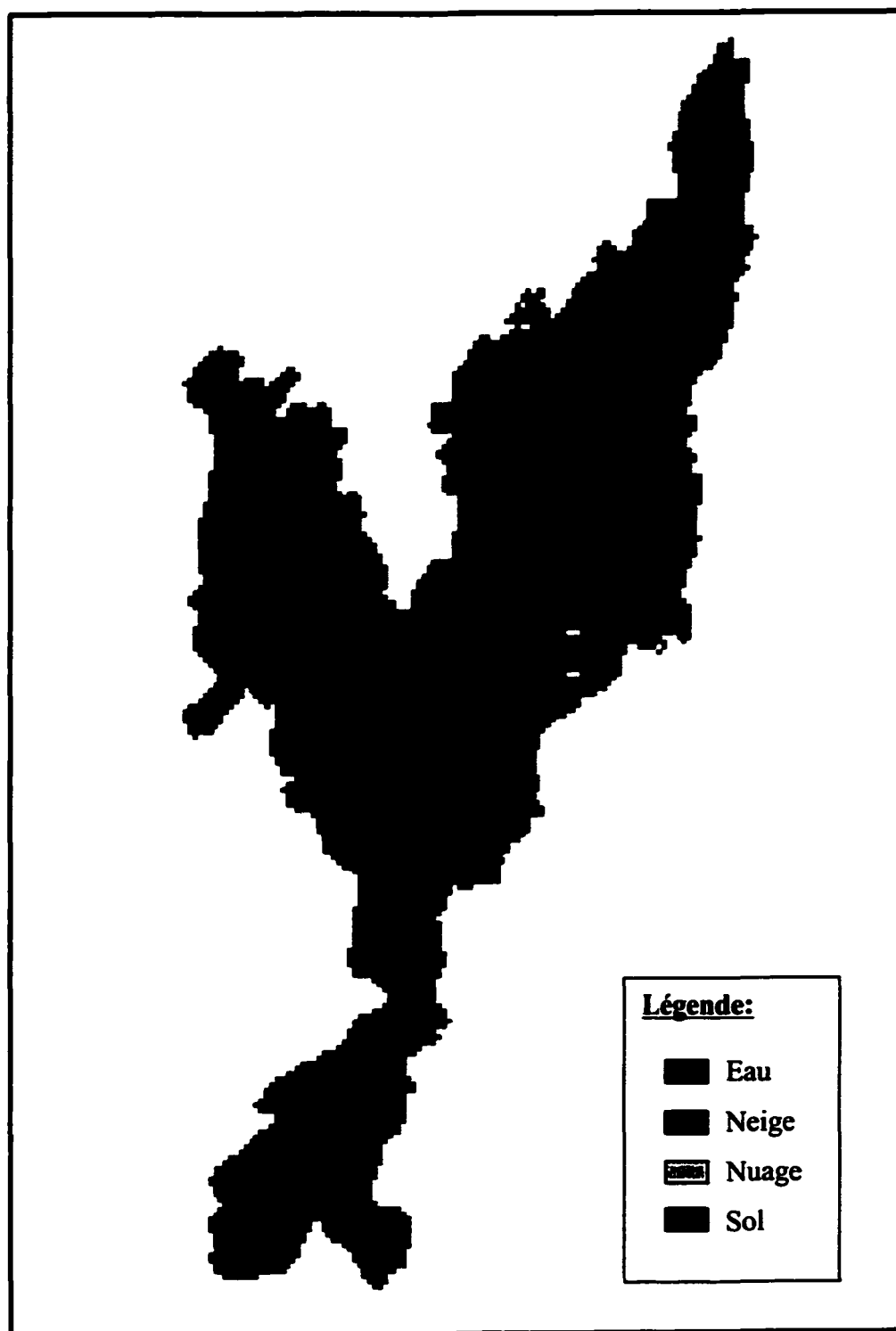
13 mai 1999

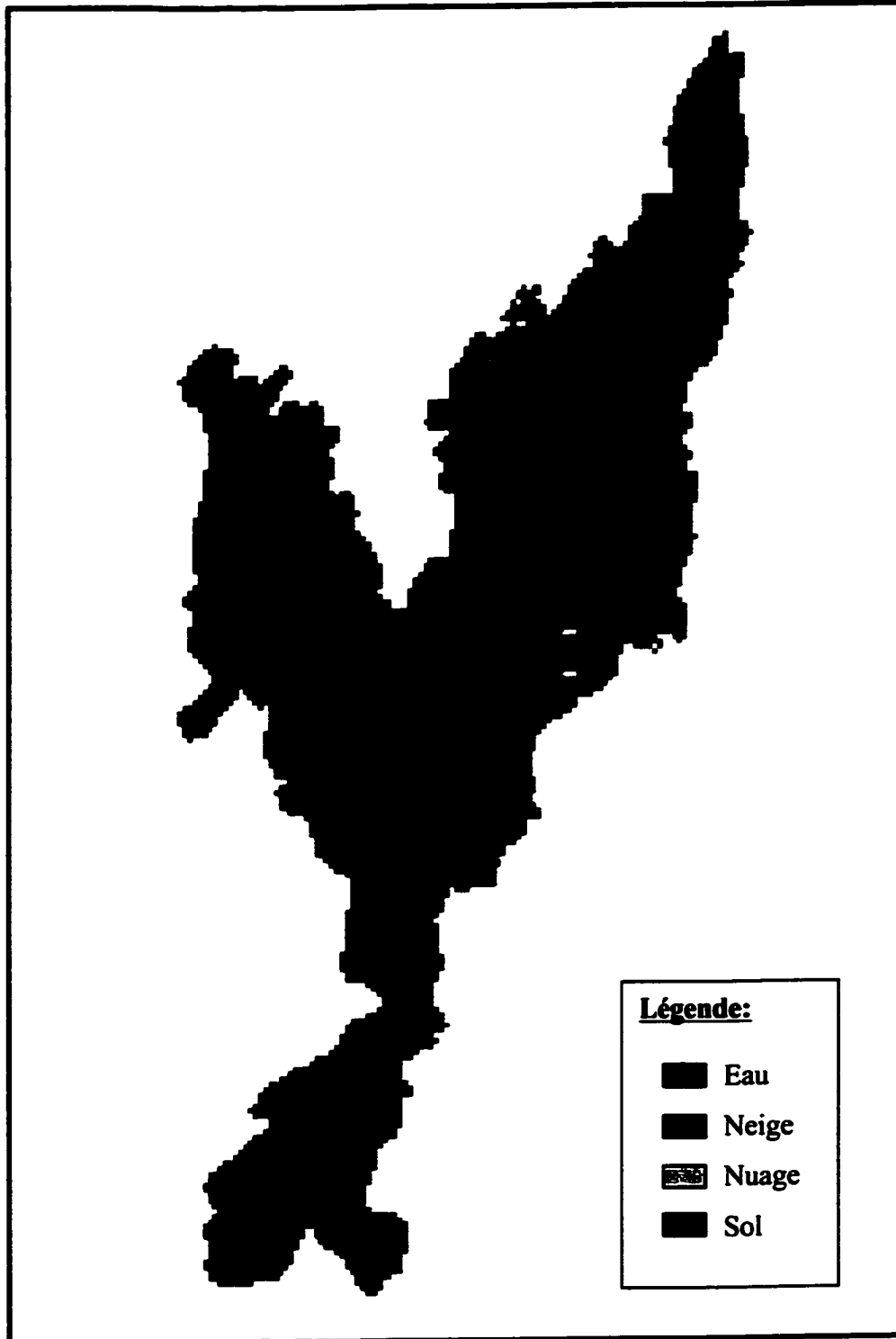


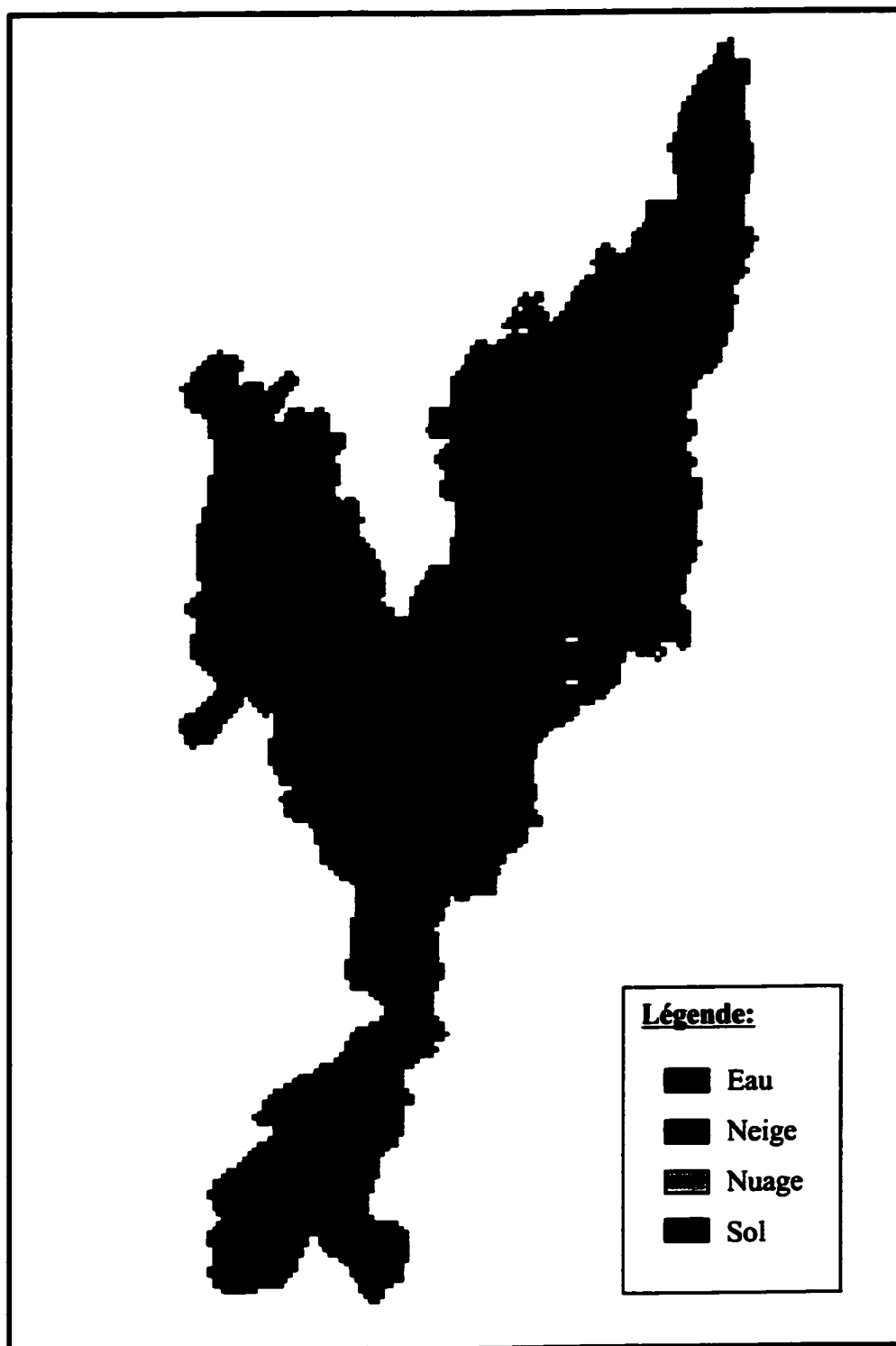
Image de télédétection AVHRR**14 mai 1999**

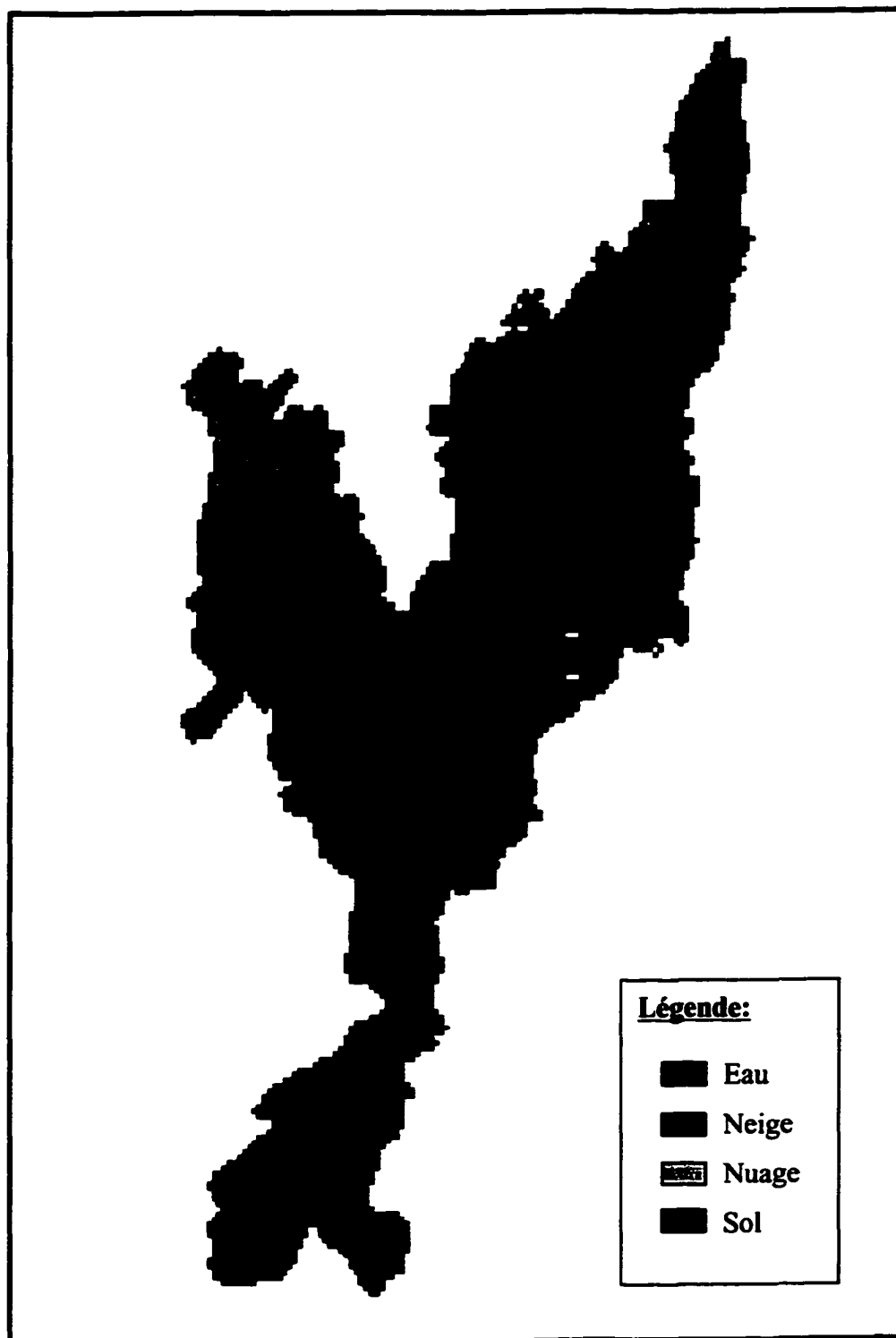
ANNEXE 2

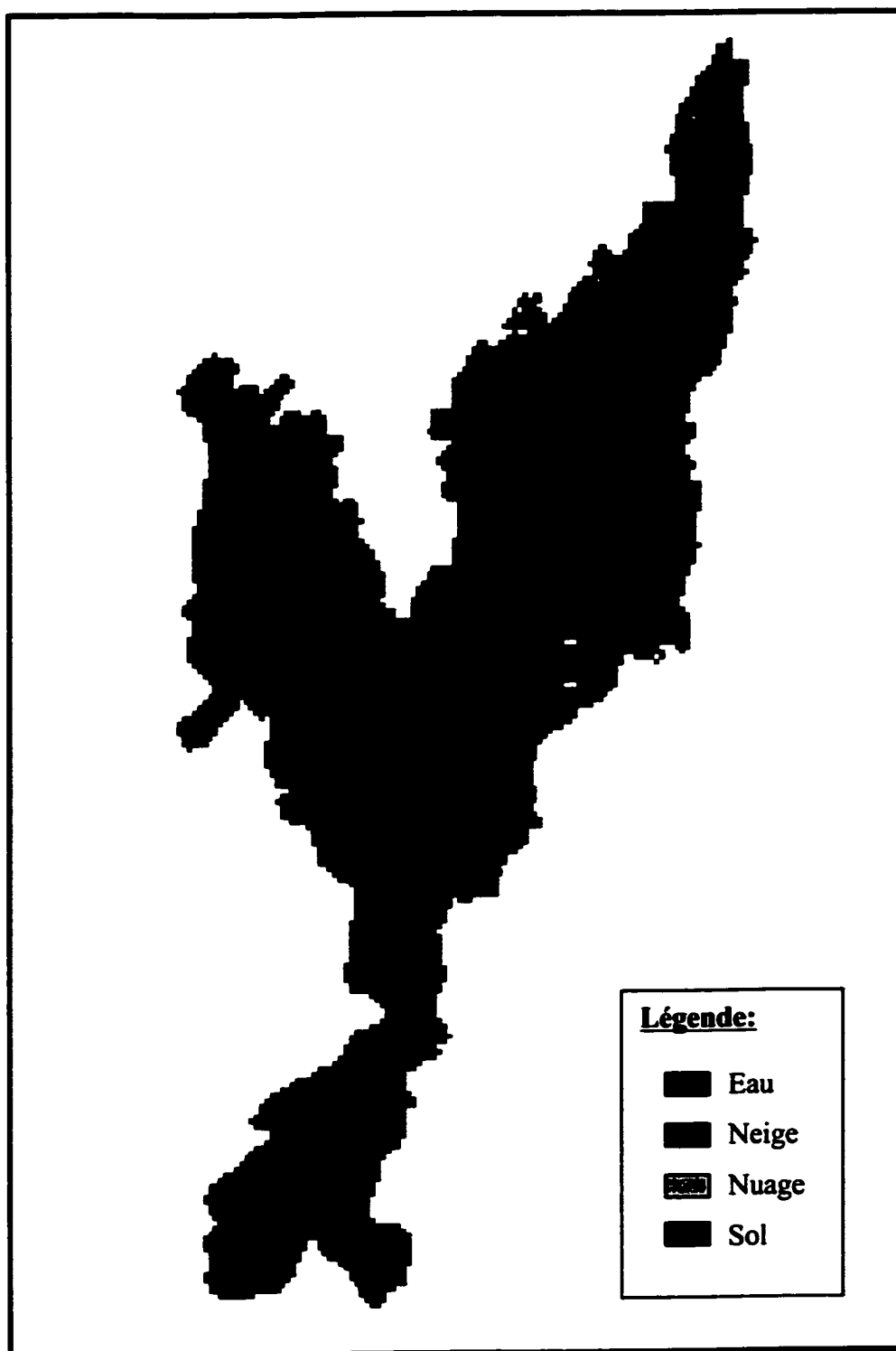
Cartes de neige extraites d'images NOAA-AVHRR

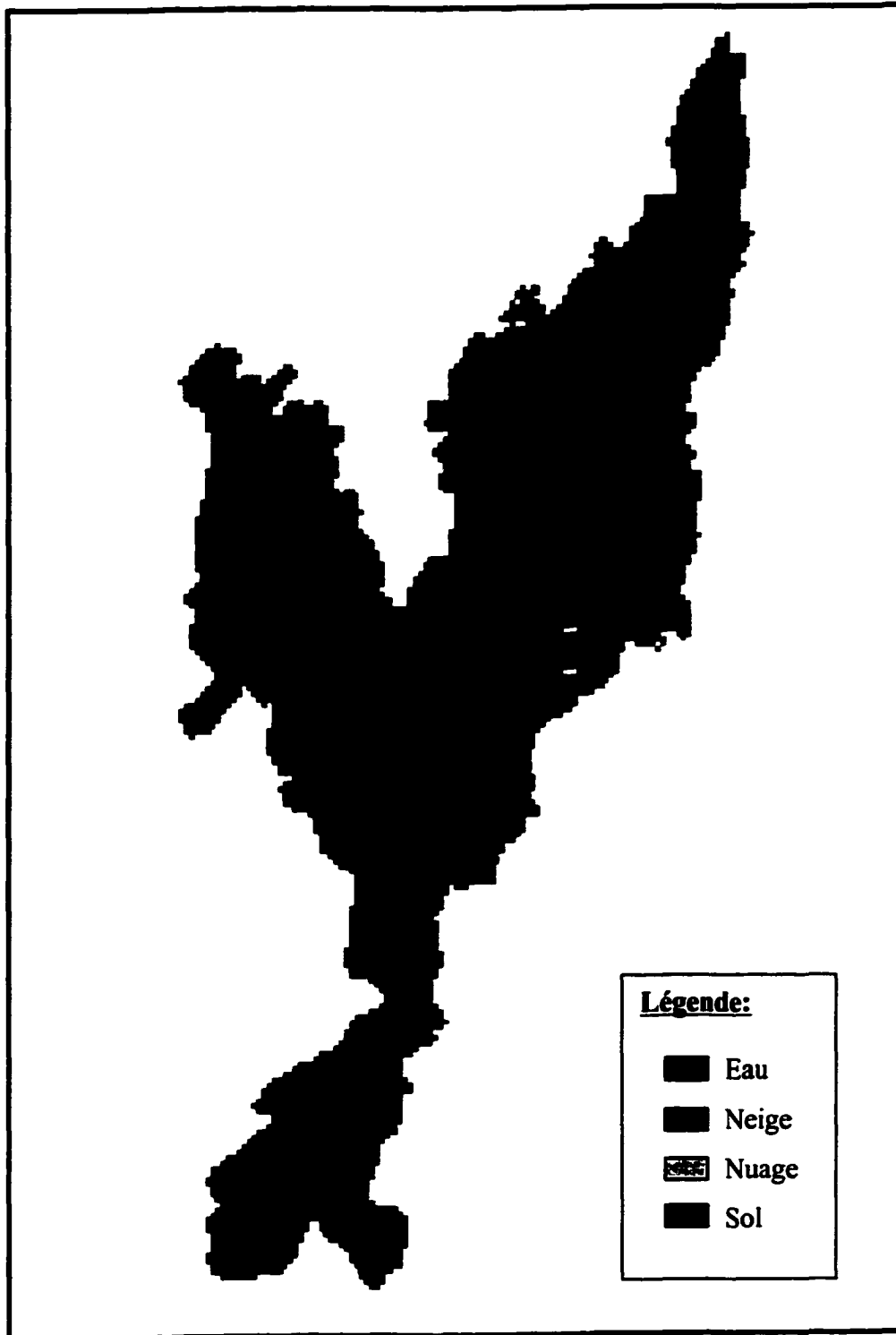
Carte de neige observée**28 avril 1999**

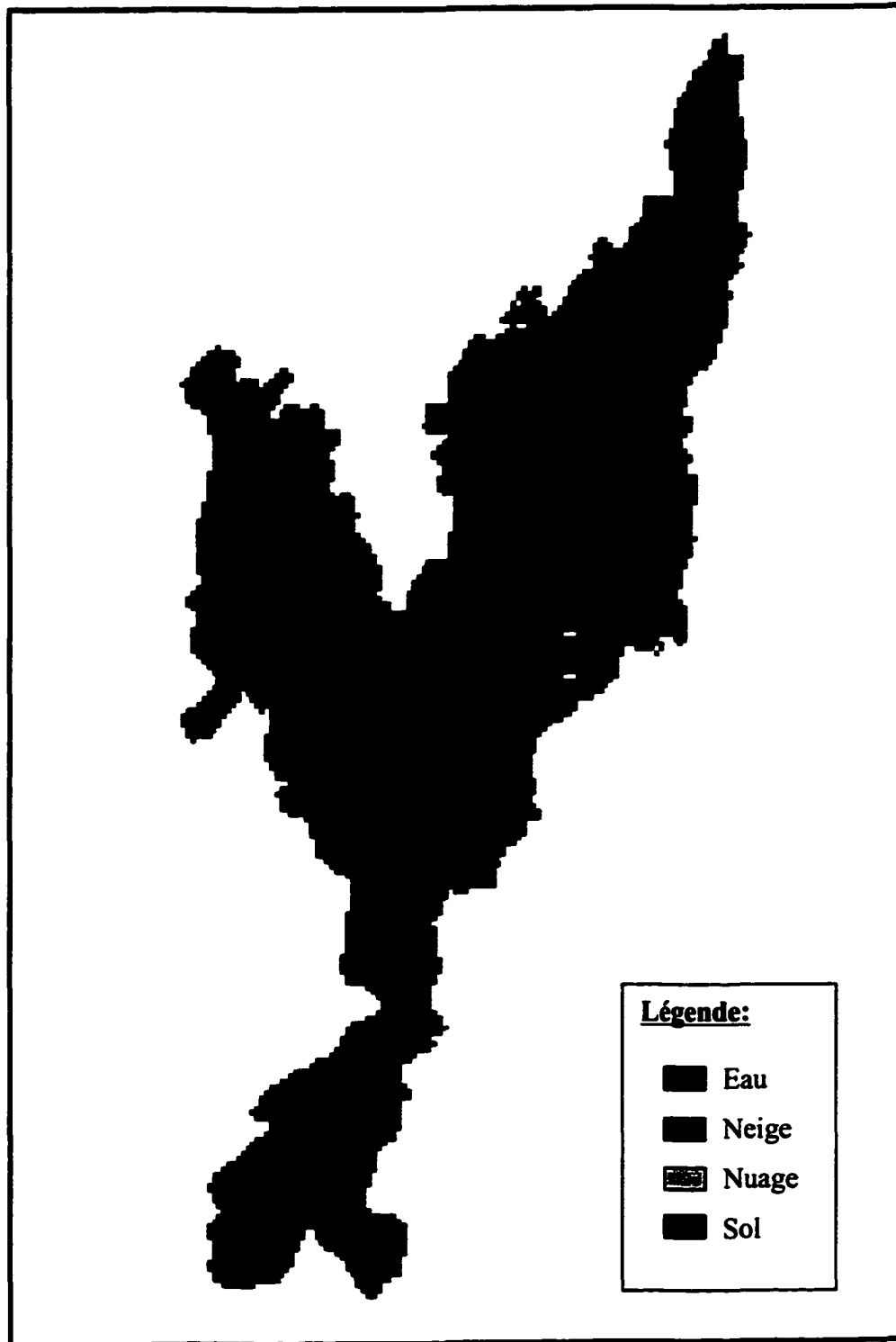
Carte de neige observée**29 avril 1999**

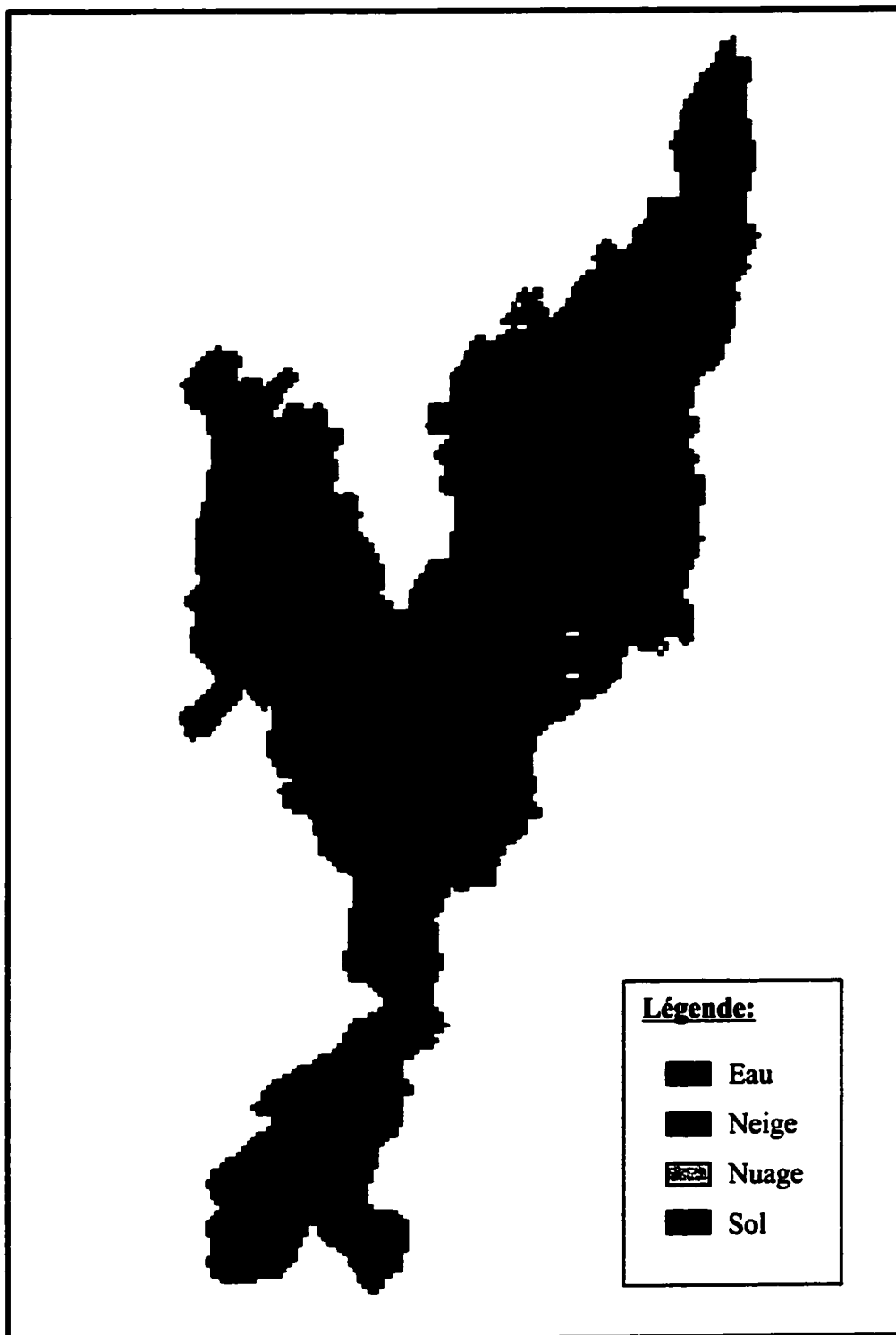
Carte de neige observée**30 avril 1999**

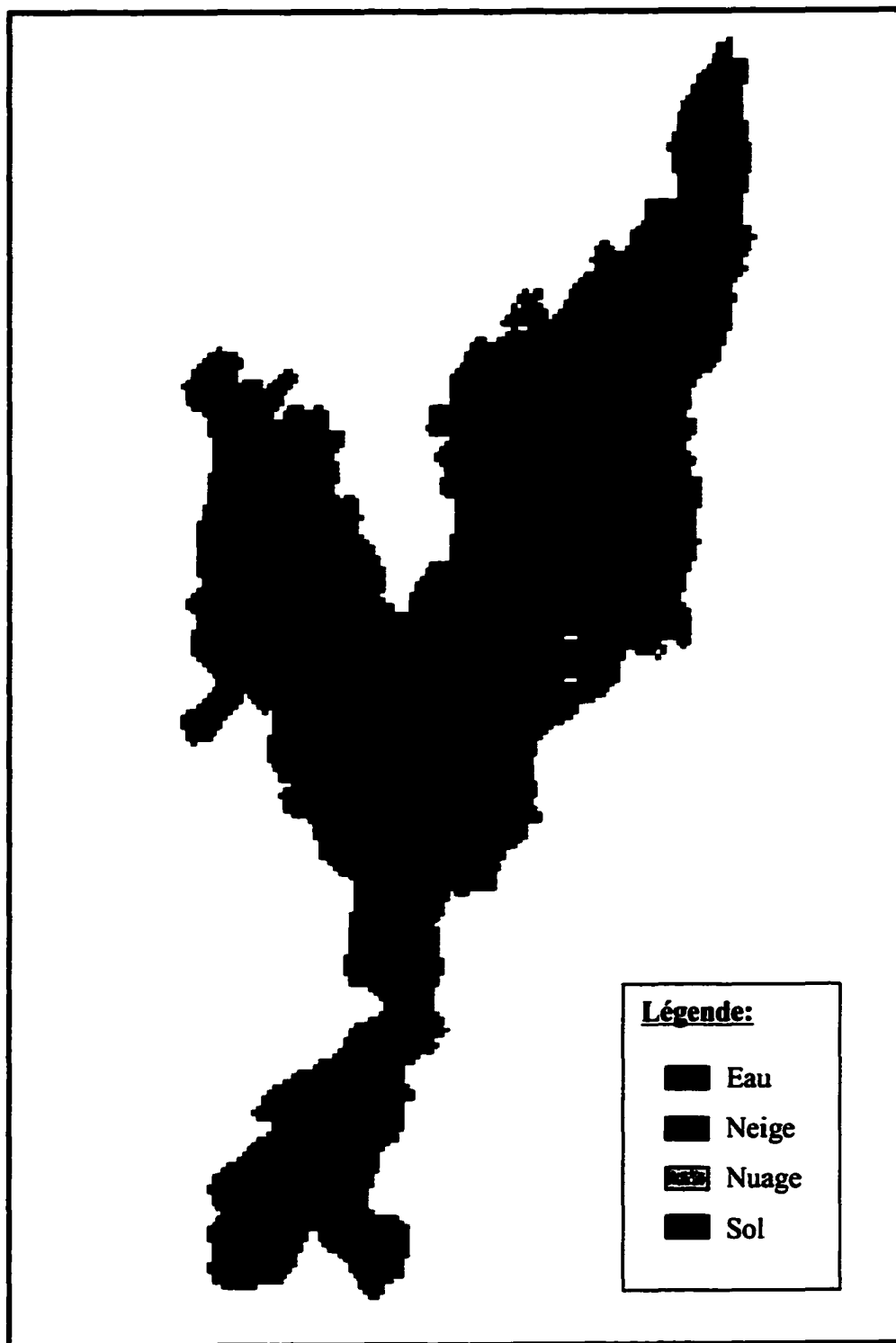
Carte de neige observée**1^{er} mai 1999**

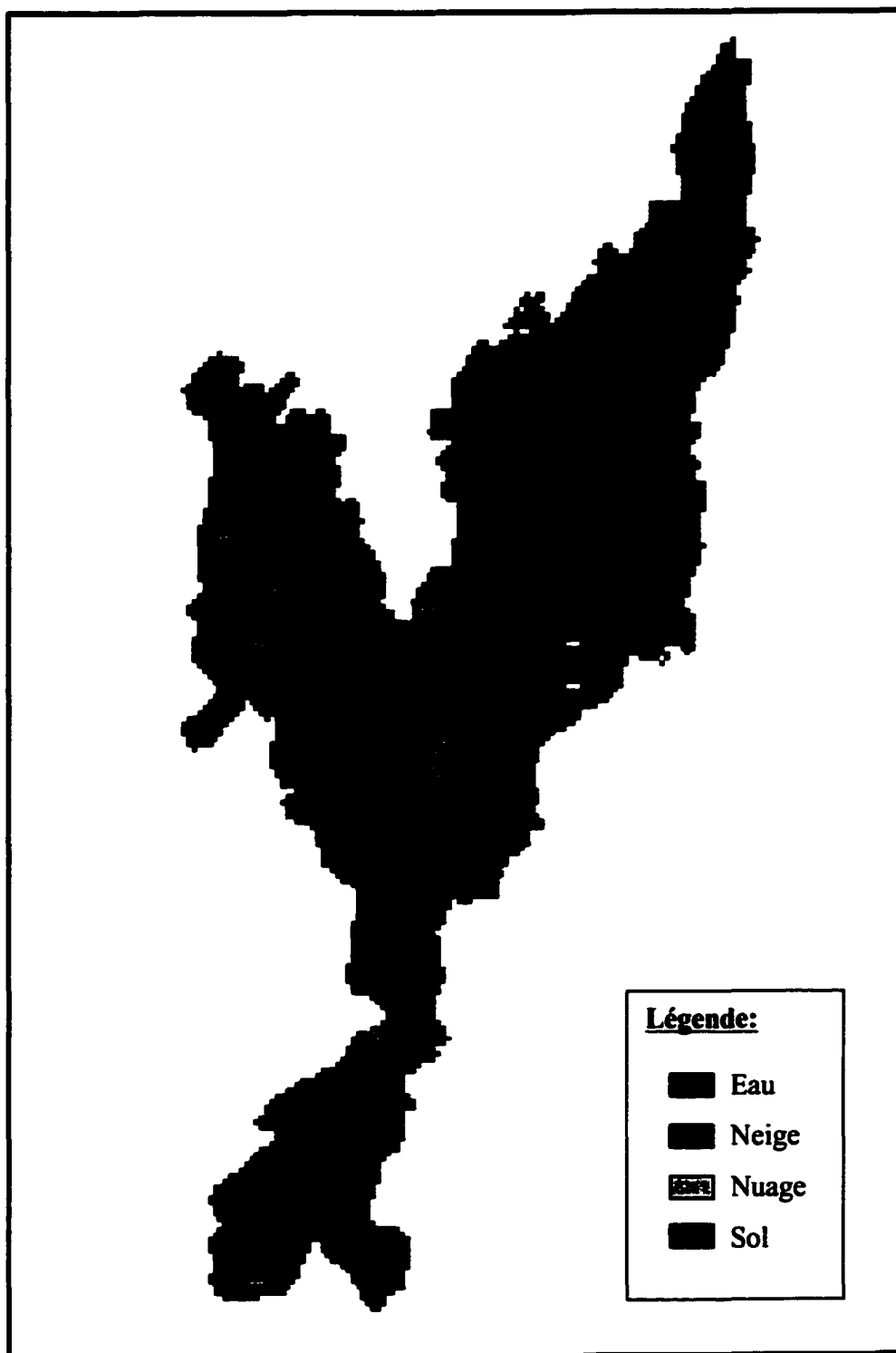
Carte de neige observée**2 mai 1999**

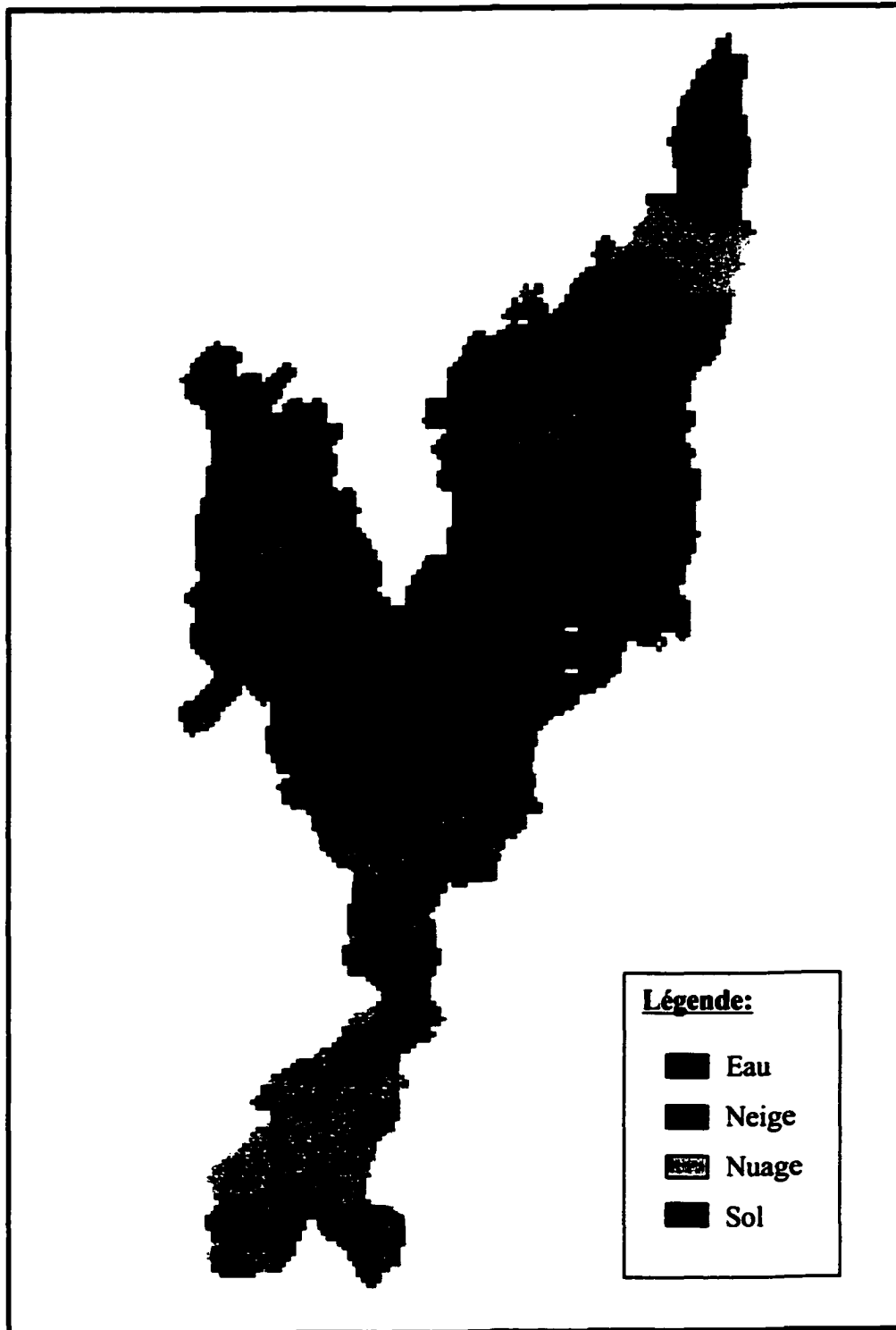
Carte de neige observée**3 mai 1999**

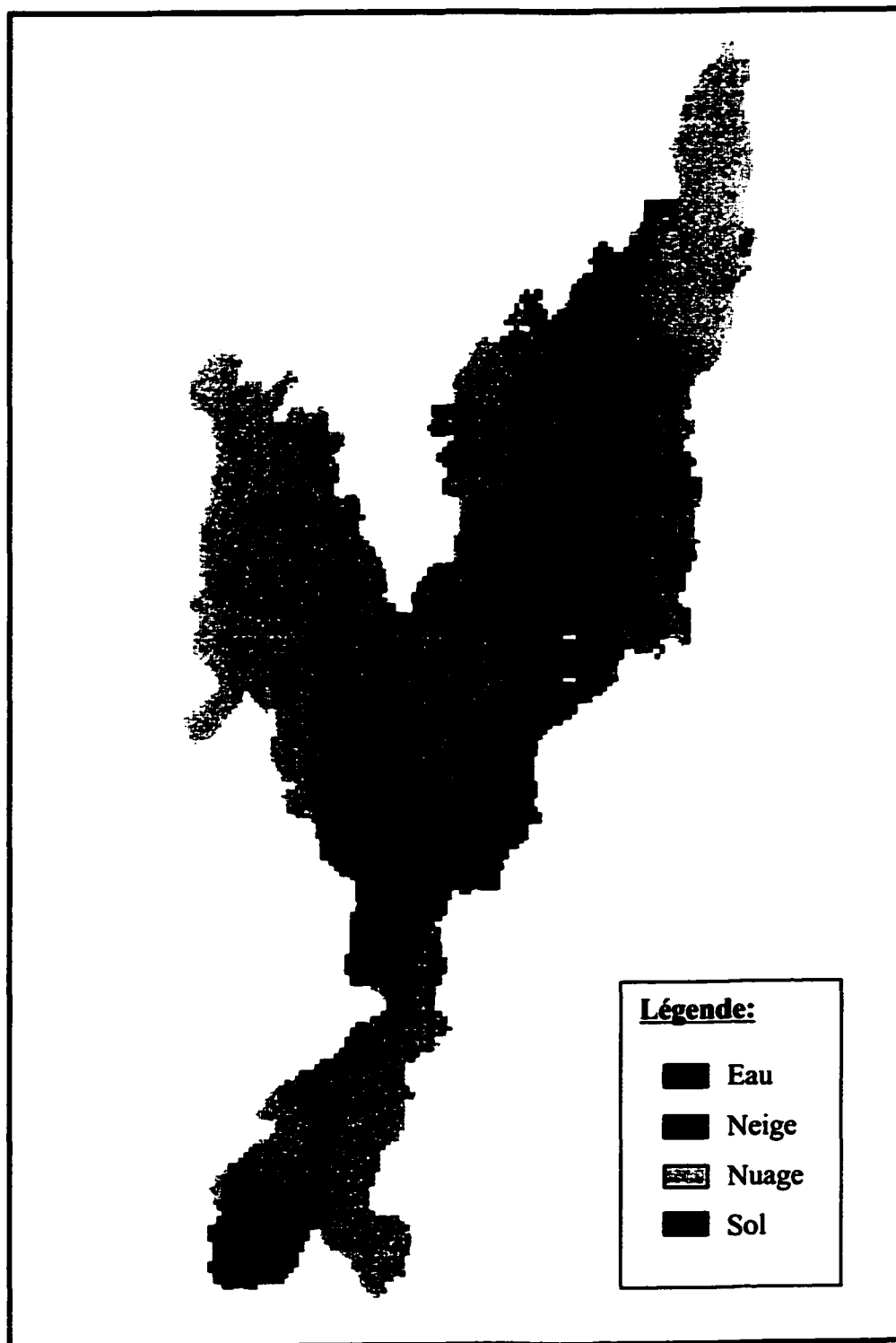
Carte de neige observée**4 mai 1999**

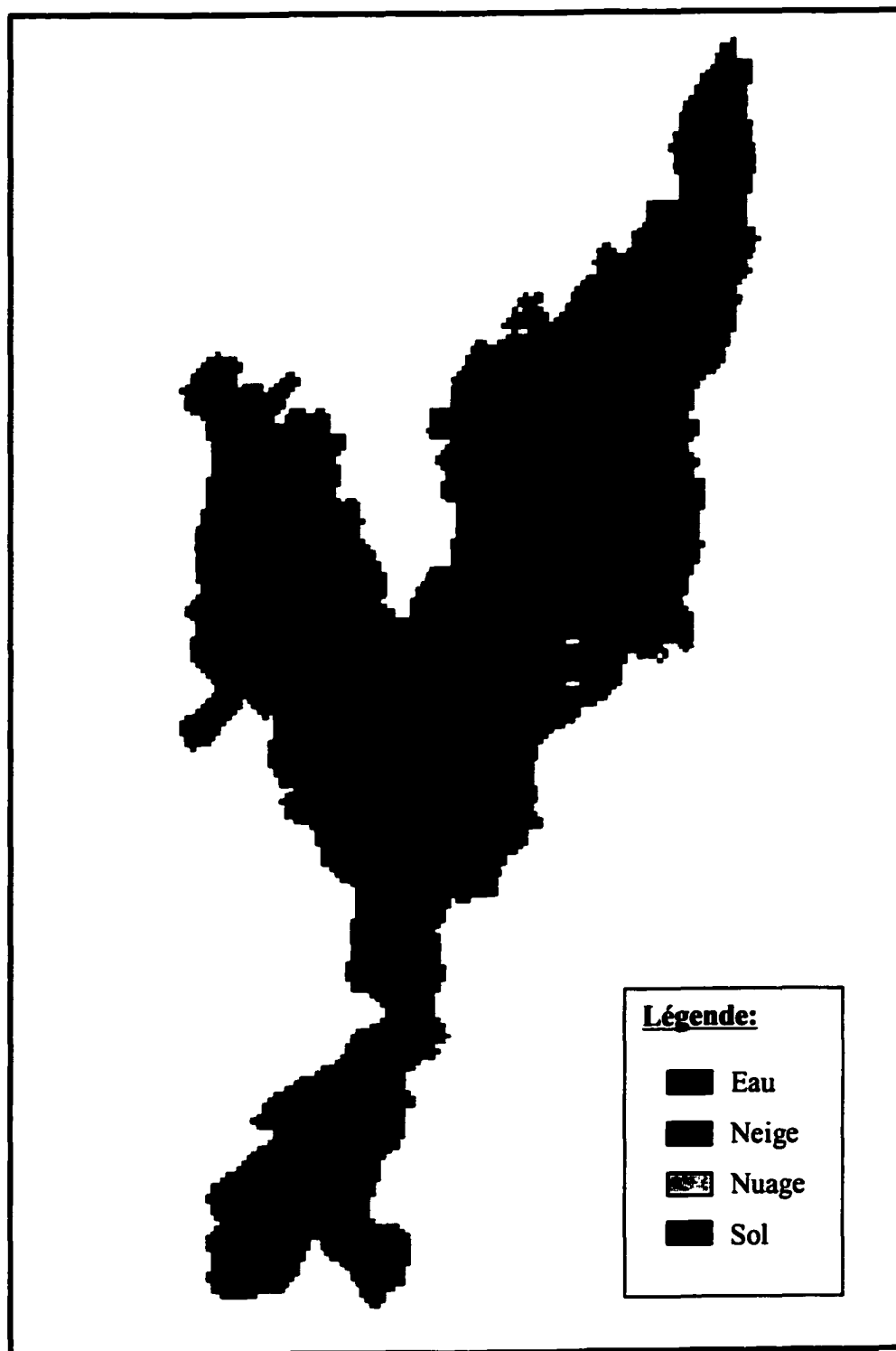
Carte de neige observée**5 mai 1999**

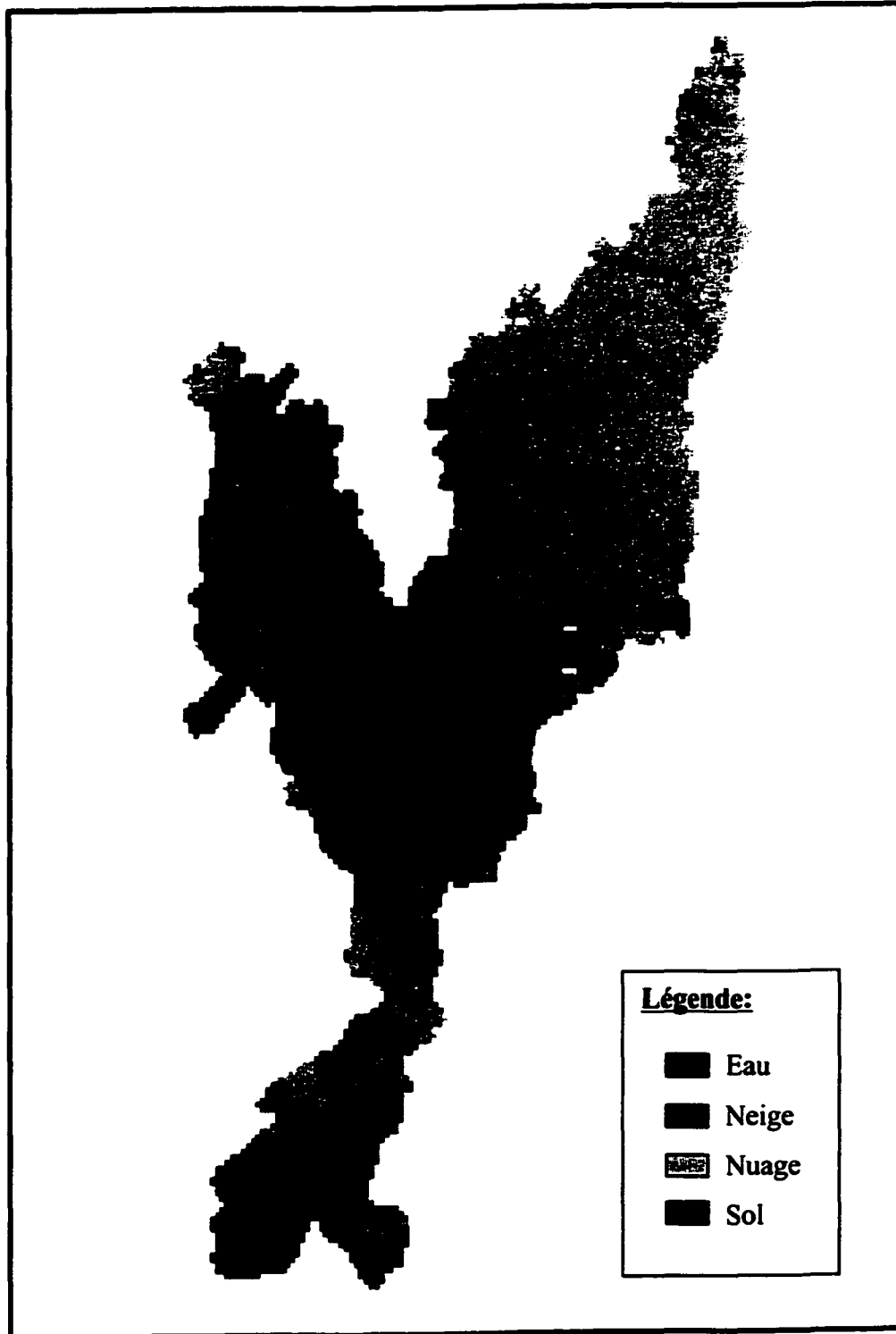
Carte de neige observée**6 mai 1999**

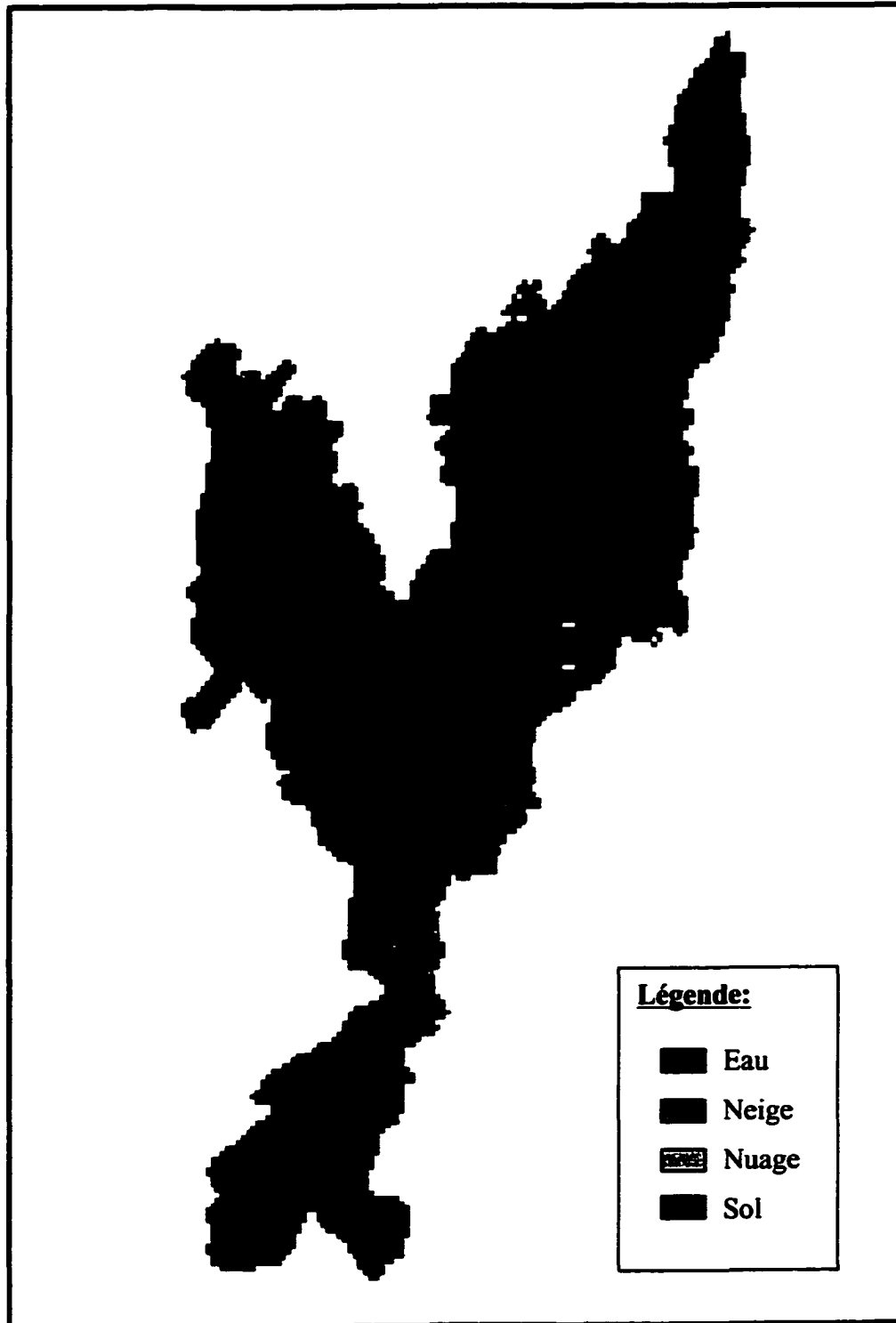
Carte de neige observée**7 mai 1999**

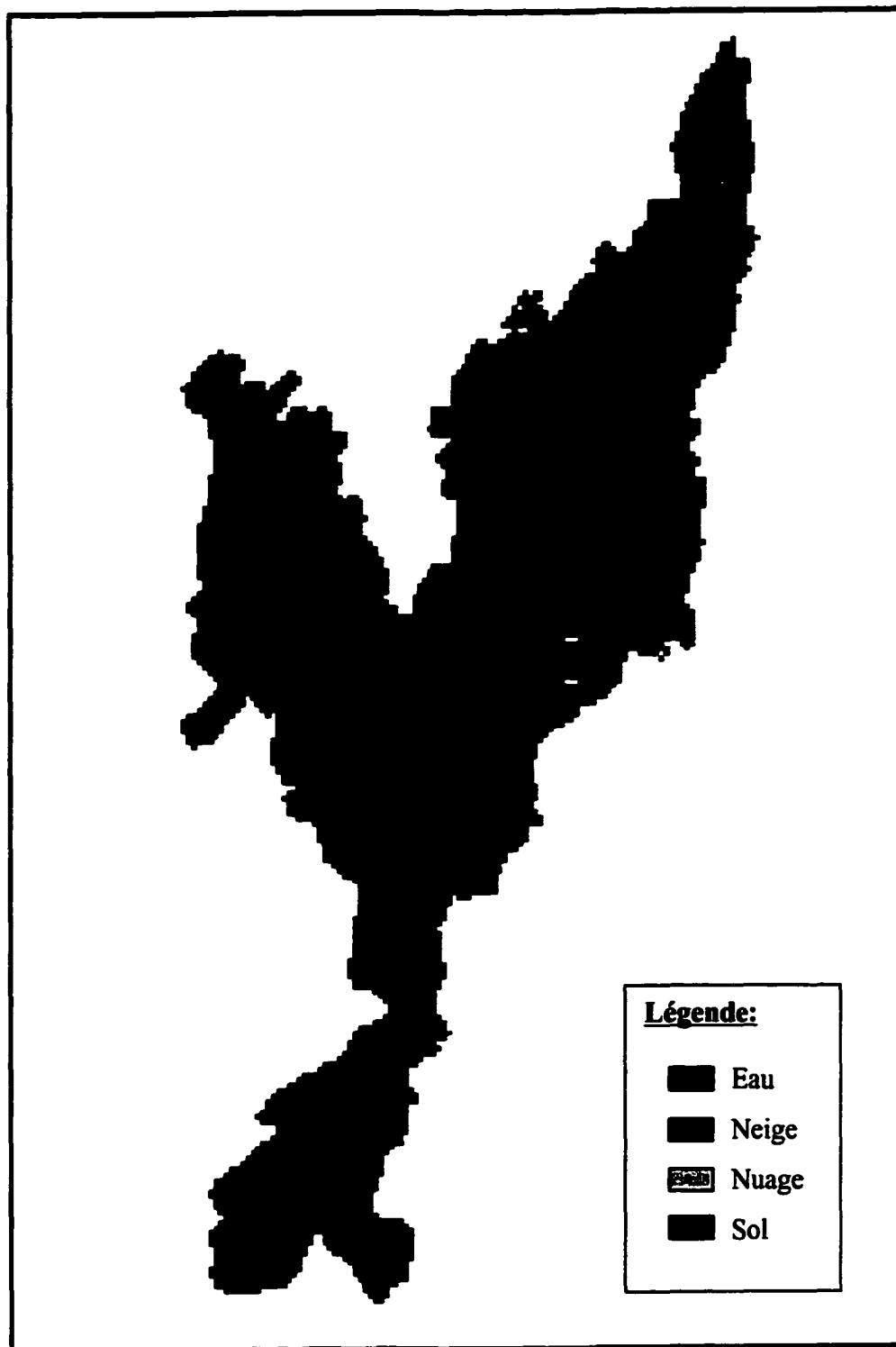
Carte de neige observée**8 mai 1999**

Carte de neige observée**9 mai 1999**

Carte de neige observée**11 mai 1999**

Carte de neige observée**12 mai 1999**

Carte de neige observée**13 mai 1999**

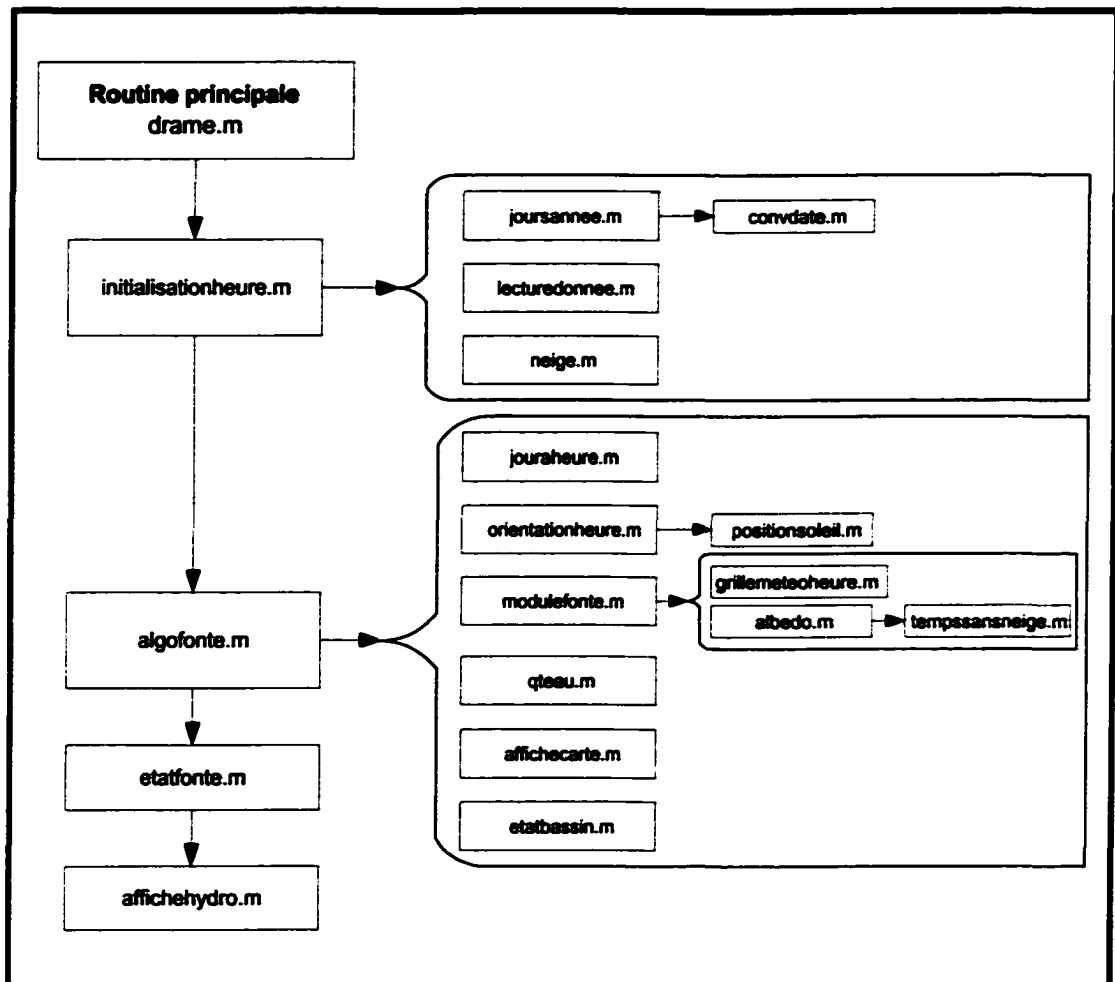
Carte de neige observée**14 mai 1999**

ANNEXE 3

Routines de programmation MATLAB du modèle de fonte de neige

Arbre de programmation

Séquence d'appel des routines



Routine principale

Drame.m

%Modèle de fonte de neige Drame

%initialisation des données de bases du modèle
initialisationheure;

%Calcul de la fonte de la date à partir de la date de
%départ pour la période spécifiée
algofonte;

%Évaluation
etatfonte;

%Affichage
affichehydro;

%fin du modèle de fonte

Routine d'initialisation des données de bases

Initialisationheure.m

```
%Cette routine mets en place les données de départ
%essentielles au modèle

%***** Informations données satellites *****
%Indiquer la date de l'image, en format: aaaammjj
datedecomparaison=19990430;

%chargement de la carte observée
load 30_avril;

%indiquer le nom de la matrice de comparaison
couvertneige=[rmasque30];

%découpage de la zone a l'étude
couvertneige=couvertneige(520:775,550:675);
%*****

%Pas de temps sur lequel la simulation a lieu en «jour»
PdeT=1/24;  %(simulation horaire)

%Date de début de la simulation selon le format "aaaammjj"
datedepart=19990401;
%calcul du jour de l'année
joursannee;

%Nombre de jours entre le début de la simulation et la
%comparaison de l'image satellite
nbjoursat=datedecomparaison-datedepart+1;

%Création de la matrice météo nécessaire au modèle
lecturedonnee;

%Compteur de jour à partir de la date précédent le début
%de la simulation pour repérage dans la matrice météo
marqueurdepart=find(datameteo(:,1,1)==datedepart)-1;

%Localisation des stations d'observation meteo dans le
%modèle numérique d'élévation (DEM)

%station au sud
st1=[222, 21];
```

```

%station au centre
%st2=[10, 10];
%station au nord
st3=[34, 109];

%Initialisation de la matrice d'élévation (DEM)
load dem;

%extraction de la région du bassin versant Chute du Diable
demcd=bassincut;

%Création de la matrice des quantités de neige initial au
%sol en millimètre équivalent en eau (SWE)
neige;

%application du masque du bassin versant
Qneigedebut=neigesol.*masque;
Qneigei=Qneigedebut;

%Température de base pour laquelle la neige se met à fondre
Tbase==0;

%Facteur de fonte de la neige
%en millimètre par degré Celcius par heure(facteur «K»)
facteurfonte=14.2;

%Limite du facteur relié a l'orientation
fmin=0.01;
fmax=1.0;

%indiquer le nombre de jour de simulation désirer à partir
%de la date de début
nbjoursimul=38;
ecart=10;

%Affichage
%Dimension de la fenêtre subplot (indique le nombre
%d'élément par fenêtre
nbrange=1;
nbcol=1;

```


Routines de calcul du jour de l'année

Joursannee.m

```
%Cette routine retourne idjour1 qui représente le jour de
%l'année correspondant à la date de départ de la simulation

%conversion de la date en vecteur
xa=datevec(convdate(datedepart));
idjour1=0;

%comptage des jours depuis le 1er janv.
if xa(2)>1;
    %les jours avant le mois indiqué
    for ii=1:(xa(2)-1);
        idjour1=idjour1+(eomday(xa(1),ii));
    end
    %jours du dernier mois
    idjour1=idjour1+xa(3);
else
    %jours du dernier mois
    idjour1=xa(3);
end
```

Convdate.m

```
function [ddmmaaaa1]= convdate(datesoumise)
%Datesoumise=AAAAMMDD
%Cette fonction permet de convertir le format date
%donné sous forme d'entier selon mmjj en chaîne de
%caractère 'jj/mm'

jour1=mod(datesoumise, 100);
mois1=mod((datesoumise-jour1)/100,100);
annee1=((datesoumise-jour1)/100-mois1)/100;
jour1=num2str(jour1);
mois1=num2str(mois1);
annee1=num2str(annee1);
sepa='-';
ddmmaaaa1=datestr(strcat( mois1, sepa, jour1, sepa,
    annee1),2);
%mmdd1=datestr(strcat(mois1, sepa, jour1),6);
```

Routine d'acquisition de données météorologiques

Lecture donnee.m

```

% Cette routine effectue la lecture des fichiers météo
% nécessaires et crée la matrice "datameteo" en établissant
% un marqueur indiquant la ligne correspondant à la date

% Identification des colonnes de données du fichier
% 1 = date
% 2 = température maximale
% 3 = température minimale
% 4 = précipitation totale

% Lecture des fichiers
lecture=[fopen('D:\Donnees\cd_1.met');
         fopen('D:\Donnees\cdp_1.met');
         fopen('D:\Donnees\manest_1.met')];

% Création de la matrice datameteo(i,j,k) où "st"
% est une station selon l'ordre de lecture défini ci-haut
datameteo=ones(92,4,3);
for st=1:3;
    datameteo(:,:,st)=fscanf(lecture(st),'%f %f %f %f',
    [4, inf])';
end

```

Routine de distribution de la neige au sol

Neige.m

```

%Cette routine initialise la matrice de neige au sol au
%début de la modélisation

%définition de la dimension de la matrice
neigesol=zeros(size(demcd));

%observation aux stations : neige équivalent en eau (mm)
neigenord=330;
neigesud=300;

%Distribution du couvert de neige selon un gradient linéaire
%du nord au sud
penteneige=(neigenord-neigesud)/(st3(1)-st1(1));
%
for nbligne=size(demcd,1):-1:1;
    neigesol(nbligne,:)= neigesud+penteneige*(nbligne-
        st1(1));
end

```

Routine de l'algorithme de fonte de neige

Algofonte.m

```

%Algorithme de fonte de neige
%Calcul la fonte de la neige sur le bassin versant
%en utilisant l'approche des degrés-jours

%variable pour compter
eacumul=0;
compteur=0;

%boucle de fonte de neige (de la date de départ)
for compteurjour=1:nbjoursimul;

    %variable de comptage journalière
    marqueurdepart=marqueurdepart+1;

    %conversion des données météo journalières en horaires
    jouraheure;

    for compteurheure=1:24;    %pour une journée (24h)

        %Calcul la fonte de la neige
        modulefonte;

        %Calcul des quantités d'eau sur le bassin
        qteau;

        %Re-initialisation de la neige de départ pour la
        %prochaine boucle
        Qneigei=Qneigef;

        %Sauvegarde des cartes générées
        %Heure du jour de sauvegarde
        if compteurheure==24

            %Affiche l'état du couvert de neige sur le bassin
            etatbassin(Qneigef, masque, datameteo
                (marqueurdepart,1,1));

            %carte de neige à partir du 27 avril 99
            if compteurjour > 27
                affichecarte;
                save (['neige'num2str(compteurjour)],
                    'Qneigef27')
            end
        end
    end
end

```

```

end

%carte de température et de SWE au 28 avril 99
if compteurjour == 28

    temp28=tindexmax;
    SWE28=Qneigef;

    save (['temp'num2str(compteurjour)],
        'temp28')
    save (['SWE'num2str(compteurjour)], 'SWE28')
end
end
end

%Affichage des cartes du bassin

%Carte de neige
figure;
load SWE28;
pcolor(flipud(SWE28.*masquen));
shading flat;
colorbar;
axis equal;
title('Model snow cover map by April 28, 1999');
text(215, 265, 'SWE in mm');

%Carte de neige
figure;
load temp28;
pcolor(flipud(temp28.*masque.*masquen));
shading flat;
colorbar;
axis equal;
title('Temperature variation map by April 28, 1999');
text(215, 265, 'Celcius');

end

```

Routine de conversion de données météorologiques

Jouraheure.m

```
%Cette routine crée une série de température horaire à
%partir des extremums journaliers
%la distribution suit un sinus

%acquisition des valeurs extrêmes
tmax=[datameteo(marqueurdepart,2,1),
      datameteo(marqueurdepart,2,3)];
tmin=[datameteo(marqueurdepart,3,1),
      datameteo(marqueurdepart,3,3)];

%création de la matrice de température
%en positionnant le max à 14h et le min à 2h
dataheure=zeros(24,2,2);
for idstat=1:2;
    for heure=1:24;
        dataheure(heure,1,idstat)=heure;
        dataheure(heure,2,idstat)= (sin(heure/24*2*pi-
            (8*2*pi/24))+1)*((tmax(idstat)-
            tmin(idstat))/2)+tmin(idstat);
    end
end

%impression de la courbe des températures
%plot(dataheure(:,1,1),dataheure(:,2,1),dataheure(:,1,2),
      dataheure(:,2,2));
```

Routine de calcul du facteur d'orientation

Orientationheure.m

```
%Cette routine calcul l'angle d'incidence du soleil avec la
%normale du sol et retourne un facteur
%de fonte « Ks » entre fmax et fmin
```

```
DEM = demcd;
```

```
%Calcul de la position du soleil
positionsoleil;
```

```
if beta>0;
```

```
    %Angle d'incidence du soleil sur la terre a midi
    % angle d'altitude avec l'horizontal
    betasoleil=beta;
    %Azimut : angle 0 degré = direction Nord(franc sud)
    phisoleil = phi;
    %transformation en radian
    betasoleil=deg2rad(betasoleil);
    phisoleil=deg2rad(phisoleil);
```

```
%Vecteur soleil
normsoleil=[cos(betasoleil)*sin(phisoleil),
            cos(betasoleil)*cos(phisoleil),sin(betasoleil)];
```

```
%-----
%Détermination de la grille de calcul;
%Distance en "x" et en "y"
%Pour le DEM avec latitude et longitude
%dx=ones(size(demcd,1),1)*linspace(lonlim(1),lonlim(2),
    size(demcd,2));
%dy=(ones(size(demcd,2),1)*linspace(latlim(2),latlim(1),
    size(demcd,1)))';
```

```
%Pour le DEM matriciel de Chute du Diable
%(par élément de matrice)
%dx=ones(size(demcd,1),1)*linspace(0,126,size(demcd,2));
%dy=(ones(size(demcd,2),1)*linspace(0,256,size(demcd,
    1)))';
dx=ones(size(demcd,1),1)*linspace(0,126,size(demcd,2))*
    960;
dy=(ones(size(demcd,2),1)*linspace(0,256,size(demcd,
    1)))'*960;
```

```

%-----

%Vecteur normal de chaque cellule du DEM (terrain)
[Nsolx,Nsoly,Nsolz] = surfnorm(dx,dy,DEM);

%Création des matrices de valeurs du vecteur soleil
Nxsoleil=normsoleil(1)*ones(size(Nsolx));
Nysoleil=normsoleil(2)*ones(size(Nsoly));
Nzsoleil=normsoleil(3)*ones(size(Nsolz));

%angle entre la normale du sol et le soleil
%(produit scalaire: uv=|u||v|cos theta)
%note: |u||v| = 1 car on utilise les vecteurs unitaires
a=Nxsoleil.*Nsolx+Nysoleil.*Nsoly+Nzsoleil.*Nsolz;
theta=acos(a);

%Correction pour les angles plus grands que 90 degrés
%90 degrés est considéré dans l'ombre
ii=find((theta)>pi/2);
theta(ii)=pi/2;

%calcul du facteur « Ks »

%formulation de base
%forientation=fmin + cos(beta).*(fmax-fmin);

%formulation avec l'effet de l'angle theta au carré
forientation=fmin + cos(theta).^2.*(fmax-fmin);

else
    forientation=fmin;
end

clear DEM

```


Positionnement du soleil

Positionsoleil.m

```
%Cette routine évalue la position du soleil en fonction du
%jour, de l'heure du jour et de la position sur la terre
%(latitude,longitude)

latitude=50;          %latitude moyenne du bassin

%calcul du jour de l'année
jourdelaannée=idjour1+compteurjour;
%EX: idjour1 = 90 = 90e jour de l'année =1 avril

%calcul de la déclinaison
delta=23.45*sin(deg2rad(360/365*(284+jourdelannée)));

%Angle horaire
%minutes avant midi
if compteurheure==12;
    mintomidi=1;
end
if compteurheure<12;
    mintomidi=((24-compteurheure)-12)*60;
end
if compteurheure>12;
    mintomidi=((24-compteurheure)+12)*60;
end

H=mintomidi/4;

%angle d'altitude du soleil
beta=rad2deg(asin((cos(deg2rad(latitude))*cos(deg2rad(delta)
)*cos(deg2rad(H)))+(sin(deg2rad(latitude))*sin(deg2rad(delta)
))));

%angle azimut solaire
phi=rad2deg(real(acos(((sin(deg2rad(beta))*sin(deg2rad(latitude)
)*sin(deg2rad(delta)))/(cos(deg2rad(beta))*cos(deg2rad(latitude)
)))));
```

Routine du module de fonte

Modulefonte.m

```

%Calcul du taux de fonte pour un pas de temps donné

%Création de la matrice de données météo
grillemeteoheure;

%Calcul de l'albédo
albedo;

%Effet de l'orientation, calcul du Ks
orientationheure;

%Orientation et facteur de fonte K x Ks
Mfacteur=facteurfonte*forientation;

%avec albédo
Mfacteur2=Mfacteur.*(1-albedodata);

%Calcul du taux de fonteMfonte=(Mfacteur2*PdeT).*(tindexmax-
    Tbase);

%Remplace les valeurs du taux de fonte négative par zéro
Mfonte(find(Mfonte<0))=0;

%Calcul de la neige restante
Qneigef= Qneigei-Mfonte;

%Remplacer par zéro les valeurs négatives de
%quantité de neige
Qneigef(find(Qneigef<0))=0;

```

Routine de création de la matrice de données météorologiques

Grillemeteoheure.m

```
%Cette routine établie les matrices de
%température et de neige au sol pour le bassin

%Définition de la dimension de la matrice météo
tindexmax=zeros(size(demcd));

%correction de la température en fonction de l'altitude
%en prenant un facteur adiabatique de 0.9 degrés Celcius par
%100 mètres d'élévation
niveaureference=demcd(st1(1),st1(2));
deltaniveau=demcd-niveaureference;
tempniveau=0.9/100.*deltaniveau;

%calcul le gradient de température entre les stations
%nord et sud en tenant compte de la différence d'élévation
pente=((dataheure(compteurheure,2,2)+tempniveau(st3(1),
    st3(2)))-dataheure(compteurheure,2,1))/(st3(1)-st1(1));

%création par interpolation de la matrice de température
%du bassin en prenant comme base de départ la station 1
for nbligne=size(demcd,1):-1:1;
    tindexmax(nbligne,:)= dataheure(compteurheure,2,1)+
        pente*(st1(1)-nbligne);
end

%correction pour l'effet d'élévation
tindexmax=tindexmax-tempniveau;
```

Routines du calcul de l'albédo

Albedo.m

```
%Cette routine calcul le coefficient attribuable à l'albédo
%de la neige se basant sur la durée depuis la dernière neige

%Calcul du temps sans précipitation de neige
%(tsn = temps sans neige)
%Création de la matrice du temps sans neige nouvellement
%tombée (pour albédo)
tempssansneige;

%Calcul du facteur
ka=0.20;
albedodata=0.4.*(1+exp(-ka.*tsn));
```

Tempssansneige.m

```
%Cette routine calcul le temps (en jour) écoulé depuis la
%dernière neige pour initialiser la variable "tsn" dans
%le calcul de l'albédo

nbjour=[0,0,0];

for k=1:3;
    i=marqueurdepart;
    while datameteo(i,4,k)==0;
        i=i-1;
        nbjour(k)=nbjour(k)+1;
    end
end
clear k;
clear i;

%Création de la matrice de la matrice « tsn »
nbligne=size(demcd,1);
idligne=[0,0];
idligne(1)=round(nbligne/3);
idligne(2)=round(2*nbligne/3);

tsn=ones(size(demcd))*nbjour(2);
```

Routine du calcul de l'eau

Qteau.m

```
%Cette routine évalue la quantité d'eau qui est produite
%lors de la fonte de la neige sur le bassin versant
```

```
%Calcul de la superficie d'une cellule de calcul
nbcel=size(find(masque==1),1);
```

```
%aire du bassin (en km²):
```

```
Abassin=9700;
```

```
%Aire d'une cellule de modélisée (en m²)
```

```
Acellule=Abassin*(1000*1000)/nbcel;
```

```
%Calcul du volume d'eau par cellule
```

```
voleau=((Qneigei-Qneigef)/1000)*Acellule;
```

```
%Calcul du volume total d'eau de fonte sur le bassin
```

```
vteau=sum(sum(voleau));
```

```
hydg(compteurjour)=vteau;
```

```
eaucumul=eaucumul+vteau;
```

Routine d'affichage des cartes

Affichecarte.m

```
%Cette routine effectue l'affichage des cartes du couvert
%de neige modélisées
```

```
%Identifiant de localisation dans la fenêtre subplot
idplot=mod(compteurjour-1,nbrange*nbcot)+1;
%Identifiant de la fenêtre figure
idfigure=((compteurjour-idplot)/(nbrange*nbcot))+1;
```

```
%Création de la figure
figure (idfigure+ecart);
subplot(nbrange,nbcot,idplot);
colormap hot(10);
hold on;
spy(demcd);
spy(Qneigef,'y');
%title(['Jour ' num2str(compteur)]);
title(convdate(datameteo(marqueurdepart,1,1)));
axis equal;
axis off;
text(200,10,['k=' num2str(facteurfonte)]);
```

Routine d'analyse de l'état du bassin

Etatbassin.m

```
function []=etatbassin(bassinetude, masque, date);

%Cette fonction affiche l'état du couvert de neige
%du bassin versant à l'étude (taux de recouvrement)

%Calcul du taux de recouvrement
recouv=size(find(bassinetude>0),1)/size(find(masque==1),1)*
    100;

%Affichage
disp(['Date: ' num2str(date) '      % de recouvrement du
      bassin: ' num2str(recouv)]);
```

Routine de l'état de la fonte

Etatfonte.m

```
%Cette routine calcul l'élévation moyenne du sol découvert

%Création d'une matrice de travail
neigemodele=Qneigef;
%Identification des cellules enneigées
neigemodele(find(neigemodele>0))=1;
%Identification des cellules découvertes
neigemodele(find(neigemodele==0))=3;
%Application du masque du bassin versant
neigemodele=neigemodele.*masque;

%Localisation dans la matrice des cellules découvertes
dat1=find(neigemodele==3);
dat2=find(couvertneige==3);

%Calcul et affiche l'élévation moyenne des cellules
%déneigées modélisées par le modèle de fonte
nivmodel=sum(demcd(dat1))/size(dat1,1);
disp(['Élévation moyenne par le modele des zones fondues:
      ' num2str(nivmodel)]);

%Calcul et affiche l'élévation moyenne des cellules
%déneigées observées par l'image AVHRR
nivcarte=sum(demcd(dat2))/size(dat2,1);
disp(['Élévation moyenne par les carte NOAA des zones
      fondues: ' num2str(nivcarte)]);
```


Routine d'affichage de l'hydrogramme du bassin

Affichehydro.m

```
%Cette routine effectue l'affichage de l'hydrogramme de  
%fonte de neige pour tout le bassin
```

```
figure(idfigure+1);  
plot(1:compteur,hydg,'b');  
title('Volume eau de fonte par jour');  
text(1, 0.1E8, ['Volume total eau de fonte ='  
    num2str(eaucumul) 'm3']);  
xlabel('jour');  
ylabel('vol.(m3)');
```

Routine d'analyse du couvert de neige par tranche d'élévation

Classeniveau.m

```
%Cette routine établit des intervalles d'élévations
%et évalue le taux de recouvrement de neige sur celle-ci.

%Définit le nombre d'intervalles
nbzone=10;

clear resultatelevation;

%Calcul des élévations
altmax=max(max(demcd));
altmin=min(demcd(find(demcd>1)));
ecartalt=altmax-altmin;

%Affichage des résultats
format short
disp('          Taux de recouvrement de la neige')
disp('int. inf.    int. sup.  Nb cell simulé  Nb cell
    total');

for zone=1:nbzone;
    borneinf=altmin+(zone-1)*(ecartalt/nbzone);
    bornesup=altmin+zone*(ecartalt/nbzone);

    resultatelevation(zone,1)=borneinf;
    resultatelevation(zone,2)=bornesup;

    idcell=find([(demcd >= borneinf)&(demcd < bornesup)]);
    resultatelevation(zone,3)=size(find(Qneigef(idcell)
        >0),1);

    %Carte produite par le modèle
    resultatelevation(zone,4)= size(idcell,1);

end
disp(num2str(resultatelevation));
```

Routine d'extraction du modèle numérique d'altitude

Decoupagebassin.m

```
%cette routine regroupe les étapes pour arriver
%au DEM du bassin versant

%Extraction de la région du DEM correspondante
%aux cartes AVHRR
latlim = [43.0113 55.0127]; lonlim = [-81.0123 -66.008];
precision=1;
[map,maplegend] = gtopo30('W100N90',precision,latlim,
    lonlim);
map(isnan(map))=0;
map=flipud(map);

%Application du masque au DEM à partir du masque
%des images NOAA
load 30_avril.mat;
masquecd=rmasque30;
masquecd(find(masquecd>0))=1;

%redimensionnement du DEM pour l'adaptation aux dimensions
%des données AVHRR
map2=imresize(map,size(masquecd));

%découpage pour obtenir le minimum de la carte
    requisecartebassin=map2(518:773,594:719);
masque=masquecd(520:775,550:675);

%correction du masque
masque(127,87:90)=1;
masque(119,87:90)=1;
masque(60,78:79)=1;
masque(56,78)=1;
```

Routine d'affichage d'un hydrogramme de rivière

Hydrogramme.m

```
%Cette routine affiche l'hydrogramme d'une rivière
%à partir d'un fichier de données.

%Lecture des données
%debit=load('d:\Donnees\debitmanou99f.deb',
    '-ascii');titre='Manouane 99';
debit=load('d:\Donnees\debitserp99f.deb',
    '-ascii');titre='Serpent 99';

%Création de la matrice de débit
debit=debit';
debit=debit(2:size(debit,1),:);
nbligne= size(debit,1)* size(debit,2);
debit=reshape(debit, nbligne,1);

%Correction des valeurs manquantes (valeur = -99)
%Correction preliminaire en utilisant le débit précédant
for i=1:nbligne;
    if debit(i)<0;
        debit(i)=debit(i-1);
    end;
end;

%Enlèvement du débit de base de la rivière
debit=debit-debit(1);

%Calcul du volume de débit
voldebit=sum(debit)*3600;

%Tracer l'hydrogramme
figure;
plot(1:nbligne, debit);
title(titre);
%text(1,15,['Volume total eau du débit =
    ' num2str(voldebit) 'm3']);
xlabel(['Volume total eau du débit =
    ' num2str(voldebit) 'm3']);
```

Routine de création de carte de neige

Transmat.m

```
% Cette routine crée une matrice de même dimension que la
% matrice de référence en mettant la valeur "1" où il y
% a une valeur non nulle et "0" où il y a une valeur nulle.
% Pour créer une matrice neige/pas neige à partir de Qneigef
```

```
function mat10=transmat(matref)

n=size(matref,1)*size(matref,2);
mat10=zeros(size(matref));

for i=1:n
    if matref(i) ~= 0;
        mat10(i) = 1;
    end
end
```

BIBLIOGRAPHIE

Anderson, E.A. (1976). A Point Energy and Mass Balance Model of a Snow Cover. *NOAA Technical Report 19*, National Weather Service, Silver Spring, MD, USA.

ASCE (1996). *Hydrology Handbook* (2e éd.). New York : ASCE.

Bonn F. et Rochon G. (1992). *Précis de télédétection*, volume 1, Presses de l'Université du Québec, Sillery, Québec, Canada.

Dunn, S.M. et Colohan, R.J.E. (1999). Developing the snow component of a distributed hydrological model : a step-wise approach based on multi-objective analysis. *Journal of Hydrology*, 223(1-2), 1-16.

Feldman, A. D. (1995). HEC-1 flood hydrograph package. Dans: *Computer models of watershed hydrology*, éditeur: Vijay P. Singh, Baton Rouge, L.A., USA : Water resources publication.

Fortin, J.P., Moussa, R., Bocquillon, C. et Villeneuve, J.P. (1995). Hydrotel, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Revue des sciences de l'eau*, 8, 97-124.

Gorte, B.G.H. (2000). Land-use and Catchment Characteristics. Dans: *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*, éditeur: G.A. Schultz and E.T. Engman, Berlin, Allemagne : Springer-Verlag.

Kite, G.W. (1995). The Slurp model. Dans: *Computer models of watershed hydrology*, éditeur: Vijay P. Singh, Baton Rouge, L.A., USA : Water resources publication.

Kite, G. W. et Pietroniro, A. (1996). Remote sensing applications in hydrological modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4), 563-591.

Klein, Andrew G., Hall, Dorothy K. et Nolin, Anne W. (2000). Development of a prototype snow albedo algorithm for the NASA MODIS Instrument. *57th Annual Eastern Snow Conference Proceedings*, Syracuse, New York, USA.

Kuchment, L.S. et Gelfan, A.N. (1996). The determination of the snowmelt rate and the meltwater outflow from a snowpack for modelling river runoff generation. *Journal of Hydrology*, 176(1-4), 23-36.

Lavallée, S., Leconte, R., Brissette, F.P. et Larouche, B. (2001). Tracking snow melt with a AVHRR-Aided numerical model. Tracking snowmelt with a AVHRR-Aided

numerical model. Présentation au *Remote sensing and hydrology symposium*, Montpellier, France, 2 au 5 octobre 2001.

Lavallée, S., Brissette, F.P., Leconte, R. et Larouche, B. (2002). Amélioration des prévisions d'un modèle numérique de fonte de neige à l'aide d'images satellites NOAA-AVHRR. Article soumis pour le 30^{ième} Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil, Montréal, Canada, 5 au 8 juin 2002.

Li, K.Y., De Jong, R. et Boisvert, J. B. (1998). Towards estimating soil moisture in the root zone using remotely sensed surface data. *Canadian journal of remote sensing*, 24(3), 255-263.

Martinec, J. (1960). The degree-day factor for snowmelt runoff forecasting. *IUGG General Assembly of Helsinki*, IAHS Commission of Surface Waters, IAHS, 51, 468-477.

Maxson, R.W., Allen, M.W. et Szeliga, T.L. (1996). Image classification by comparison of angles created between multi-channel vectors and an empirically selected reference vector. *1996 North American Airborne and Satellite Snow Data CD-ROM*, Chanhassen, Minnesota : National Weather Service. [En ligne]. <http://www.nohrsc.nws.gov/html/papers/theta/theta.htm> (consulté le 10 juin 2001)

McCuen, Richard H. (1998). *Hydrologic analysis and design* (2^e édition). Upper saddle River, New Jersey : Prentice-Hall.

Quick, M.C. (1995). The UBC watershed model. Dans: *Computer models of watershed hydrology*, éditeur: Vijay P. Singh, Baton Rouge, L.A., USA : Water resources publication.

Rango, A. (1995). The snowmelt runoff model (SRM). Dans: *Computer models of watershed hydrology*, éditeur: Vijay P. Singh, Baton Rouge, L.A., USA : Water resources publication.

Rango, A., Walker, A. E. et Goodison, B. E. (2000). Snow and ice. Dans: *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*, éditeur: G.A. Schultz and E.T. Engman, Berlin, Allemagne : Springer-Verlag.

Richards, J. A. (1993). *Remote sensing digital image analysis*, London, Angleterre : Springer-Verlag.

Rott, H., Baumgartner, M., Ferguson, R., Glendinning, G., Johansson, B., Nagler, T., Pirker, O., Quegan, S. et Wright, G. (1999). HydAlp, a European project on the use of remote sensing for snowmelt runoff modelling and forecasting. *International*

Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 99 proceedings, IEEE 1999 International, 3, 1779-1782.

Rousselle, J., Watt, W.E., Lathem, K.W., Neill, C.R. et Richards, T.L. (1990). *Hydrologie des crues au Canada: Guide de planification et de conception*. Ottawa, Ont.: Conseil national de recherches du Canada, Comité associé d'hydrologie.

Schultz, G.A et Engman, E.T. (2000) *Remote Sensing in Hydrology and Water Management*, Berlin, Allemagne : Springer-Verlag.

Simpson, J.J., Stitt, J.R. et Sienko, M. (1998). Improved estimates of the areal extend of snow cover from AVHRR data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 1-23.

U.S. Army Corps of Engineers (1956). *Snow Hydrology*. North Pacific Division, Portland, OR, USA.